



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY**

**A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**SIMULACE TRIPLE PLAY SLUŽEB PRO SÍŤ DALŠÍ  
GENERACE**

TRIPLE PLAY SIMULATIONS FOR NEXT GENERATION NETWORKS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Pavel Sikora**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Tomáš Horváth**

**BRNO 2016**



# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Teleinformatika**

Ústav telekomunikací

**Student:** Pavel Sikora

**ID:** 164800

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2015/16

**NÁZEV TÉMATU:**

## Simulace Triple Play služeb pro síť další generace

### POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

V bakalářské práci se bude nutně seznámit se standardem XG-PON pro pasivní optické sítě a principem přenosu dat pro Triple Play služby. Dále v teoretické části bude popsán princip alokace šířky pásma pro pasivní optické sítě další generace. V praktické části budou navrženy simulační modely pro služby Triple Play a statické/dynamické přidělování šířky pásma pro koncové stanice v simulačním nástroji NS-3. Student dále provede vlastní modifikaci stávajícího nebo vlastního algoritmu pro přidělování šířky pásma a porovná dosažené výsledky.

### DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] YUANQIU LUO, Frank EFFENBERGER a BO GAO. Transmission convergence layer framing in XG-PON1. 2009 IEEE Sarnoff Symposium. IEEE, 2009, : 1-5. DOI: 10.1109/SARNOF.2009.4850314. ISBN 978-1-42-4-3381-0. Dostupné také z: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=4850314>

[2] HOSSEN, Monir a Masanori HANAWA. Multi-OLT and multi-wavelength PON-based open access network for improving the throughput and quality of services. Optical Switching and Networking. 2015, 15: 148-159. DOI: 10.1016/j.osn.2014.09.001. ISSN 15734277. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1573427714001106>

**Termín zadání:** 1.2.2016

**Termín odevzdání:** 1.6.2016

**Vedoucí práce:** Ing. Tomáš Horváth

**Konzultant bakalářské práce:**

**doc. Ing. Jiří Mišurec, CSc., předseda oborové rady**

### UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## **ABSTRAKT**

Práce pojednává o XG-PON sítích. Obsahuje popis fyzické vrstvy z hlediska parametrů, jejího dělení a také možnostmi větvení. Popisuje také přenosovou vrstvu a její podvrstvy. Uvádí postup aktivace ONU jednotky po připojení do ODN. V neposlední řadě práce obsahuje popis DBA algoritmů včetně podrobného vyobrazení referenčního modelu DBA algoritmu a znázornění dvou DBA algoritmů implementovaných v praxi. Práce dále uvádí simulaci XG-PON sítě v programu NS-3, s využitím prostého DBA algoritmu a GIANT DBA algoritmu. Obsažena je také modifikace GIANT DBA algoritmu snižující zpoždění přenosu dat.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

PON, ODN, DBA, pasivní optická síť, optická distribuční síť, dynamické přidělování šířky pásma, GIANT, simulace, NS-3, ONU, OLT

## **ABSTRACT**

This thesis deals with XG-PON networks. It describes the parameters of the physical layer, its divisions and the branching possibilities. It also describes the transfer layer and its sublayers, discloses the activation process of ONU units when ONU unit connected to ODN. Finally, the thesis describes DBA algorithm including a detailed representation of a DBA algorithm reference model and a representation of the two DBA algorithms implemented in practice. Simulations of Triple Play services in the network with software NS-3 are also included. Simulations using simple DBA algorithm and GIANT algorithm. Thesis contains too modification of GIANT DBA decreasing data transfer delay.

## **KEYWORDS**

PON, ODN, DBA, passive optical network, optical distribution network, dynamic bandwidth allocation, GIANT, simulations, NS-3, ONU, OLT

SIKORA, Pavel *Simulace Triple Play služeb pro síť další generace*: bakalářská práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2016. 55 s. Vedoucí práce byl Ing. Tomáš Horváth,

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Simulace Triple Play služeb pro síť další generace“ jsem vypracoval(a) samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor(ka) uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil(a) autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl(a) nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom(a) následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu Ing. Tomáši Horváthovi, za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Brno .....

.....

podpis autora(-ky)

## PODĚKOVÁNÍ

Výzkum popsáný v této bakalářské práci byl realizován v laboratořích podpořených z projektu SIX; registrační číslo CZ.1.05/2.1.00/03.0072, operační program Výzkum a vývoj pro inovace.

Brno .....

.....  
podpis autora(-ky)

# OBSAH

<b>Úvod</b>	<b>12</b>
<b>1 Fyzická vrstva</b>	<b>13</b>
<b>2 Přenosová vrstva</b>	<b>17</b>
2.1 XGTC adaptační podvrstva . . . . .	17
2.2 XGTC rámcová podvrstva . . . . .	17
2.3 XGTC PHY adaptační podvrstva . . . . .	17
2.4 Management XG-PON systému . . . . .	18
<b>3 Aktivace ONU jednotky</b>	<b>19</b>
3.1 Initial state (O1) . . . . .	19
3.2 Serial Number state (O2-3) . . . . .	19
3.3 Ranging state (O4) . . . . .	20
3.3.1 Výpočet vyrovnávacího zpoždění . . . . .	20
3.4 Operation state (O5) . . . . .	21
3.5 Intermittent LODS state (O6) . . . . .	21
3.6 Emergency Stop state (O7) . . . . .	21
<b>4 Dynamic Bandwith Allocation</b>	<b>23</b>
4.1 Získávání obsazenosti fronty ONU jednotek . . . . .	23
4.2 Referenční model DBA . . . . .	24
4.3 Modifikovaný Max-Min Fair DBA pro XG-PON . . . . .	25
4.4 GIANT (GigaPON Access Network) DBA . . . . .	26
4.4.1 GIANT MAC (Medium Acces Controller) . . . . .	27
<b>5 Simulace v NS-3</b>	<b>29</b>
5.1 Simulační topologie XG-PON . . . . .	29
5.2 Popis generovaného toku dat . . . . .	29
5.2.1 Video On Demand . . . . .	30
5.2.2 Voice Over IP . . . . .	31
5.2.3 Hypertext Transfer Protocol . . . . .	31
5.3 Simulace . . . . .	32
5.3.1 Simulace bez DBA . . . . .	32
5.4 Výsledek simulace . . . . .	34
5.5 Simulace využívající GIANT DBA . . . . .	35
5.5.1 Výsledky simulace . . . . .	40
5.6 Optimalizace algoritmu GIANT . . . . .	42

5.6.1	Výsledky simulace . . . . .	43
5.7	GNU Plot . . . . .	44
5.8	Net Anim . . . . .	47
<b>6</b>	<b>Závěr</b>	<b>48</b>
	<b>Literatura</b>	<b>49</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>52</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>54</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého DVD</b>	<b>55</b>



# SEZNAM OBRÁZKŮ

1.1	Příklad topologie XG-PON sítě . . . . .	13
1.2	Příklady větvení XG-PON sítě . . . . .	16
3.1	Diagram aktivace ONU jednotky [4] . . . . .	22
5.1	Topologie simulované sítě . . . . .	30
5.2	Graf zpoždění přenosu dat při použití 50 ONU jednotkách . . . . .	34
5.3	Graf zpoždění přenosu dat při použití 150 ONU jednotek . . . . .	35
5.4	Graf ztráty paketů při použití 150 ONU jednotek . . . . .	36
5.5	Graf zpoždění přenosu dat při použití 200 ONU jednotek . . . . .	36
5.6	Graf ztráty paketů při použití 200 ONU jednotek . . . . .	37
5.7	Topologie pro simulaci GIANT DBA . . . . .	37
5.8	Graf zpoždění přenosu dat při použití 50 ONU jednotek . . . . .	40
5.9	Graf zpoždění přenosu dat při použití 150 ONU jednotek . . . . .	41
5.10	Graf zpoždění přenosu dat při použití 200 ONU jednotek . . . . .	42
5.11	Graf ztráty paketů VoD služby při použití 200 ONU jednotek . . . . .	43
5.12	Graf zpoždění přenosu HTTP služby při použití 32 ONU jednotek . . . . .	45
5.13	Graf zpoždění přenosu VoD služby při použití 32 ONU jednotek . . . . .	46
5.14	Graf zpoždění přenosu VoIP služby při použití 32 ONU jednotek . . . . .	46

# SEZNAM TABULEK

1.1	Parametry sítě XG-PON [2]	15
1.2	Výkon vysílacího laseru [2].	15
1.3	Maximální výkon přijímacího paprsku [2].	15
1.4	Hodnoty útlumových tříd ODN [2].	15
5.1	Zpoždění přenosu dat HTTP služby před a po úpravě GIANT DBA.	43
5.2	Zpoždění přenosu dat VoD služby před a po úpravě GIANT DBA.	44
5.3	Zpoždění přenosu dat VoIP služby před a po úpravě GIANT DBA.	44

# SEZNAM KÓDŮ

5.1	VoD aplikace . . . . .	30
5.2	VoD sink . . . . .	31
5.3	Nastavení generátoru IP adres pro XG-PON uzly . . . . .	32
5.4	Přiřazení IP adres uzlům . . . . .	32
5.5	Přiřazení IP adres ONU jednotkám a klientským zařízením . . . . .	33
5.6	Získání parametrů pro přiřazení IP adresy OLT jednotce a serverům .	33
5.7	Přiřazení ONU jednotkám AllocID . . . . .	33
5.8	Přiřazení upstream a downstream portu . . . . .	34
5.9	Nastavení parametrů GIANT algoritmu jednotlivým klientským zaří- zením . . . . .	38
5.10	Nastavení počátečních časovačů . . . . .	38
5.11	Nastavení šířek pásma a SI hodnoty pro všechny ONU jednotky . . .	39
5.12	Nastavení počátečních časovačů . . . . .	39
5.13	Nastavení IP adres pro OLT a ONU jednotky . . . . .	39
5.14	Přiřazení uzlům AllocID . . . . .	39
5.15	Před modifikací . . . . .	42
5.16	Vytvoření monitoru . . . . .	44
5.17	Vytvoření a nastavení Gnuplot . . . . .	45
5.18	Vytvoření a nastavení datasetu . . . . .	45
5.19	Modifikovaný kód před modifikací . . . . .	46
5.20	Ošetření výskytu nulové hodnoty . . . . .	47
5.21	Závěrečná tvorba jednoho z grafů . . . . .	47

# ÚVOD

V dnešní době již optické sítě začínají nahrazovat generačně starší metalické sítě. Jedním takovým je síť typu PON (Passive Optical Network), tedy optická síť nevyužívající žádné aktivní prvky podél své sítě.

První kapitola popisuje XG-PON (10 Gigabit-Passive Optical Network) s ohledem na celkovou funkčnost. Popisuje topologii sítě, různé konfigurace zapojení splitteru jednotlivých koncových účastníků s praktickým příkladem a poskytuje všechny parametry fyzické vrstvy. Druhá kapitola se zabývá popisem přenosové vrstvy sítě XG-PON. Jsou zde popsány jednotlivé podvrstvy přenosové vrstvy.

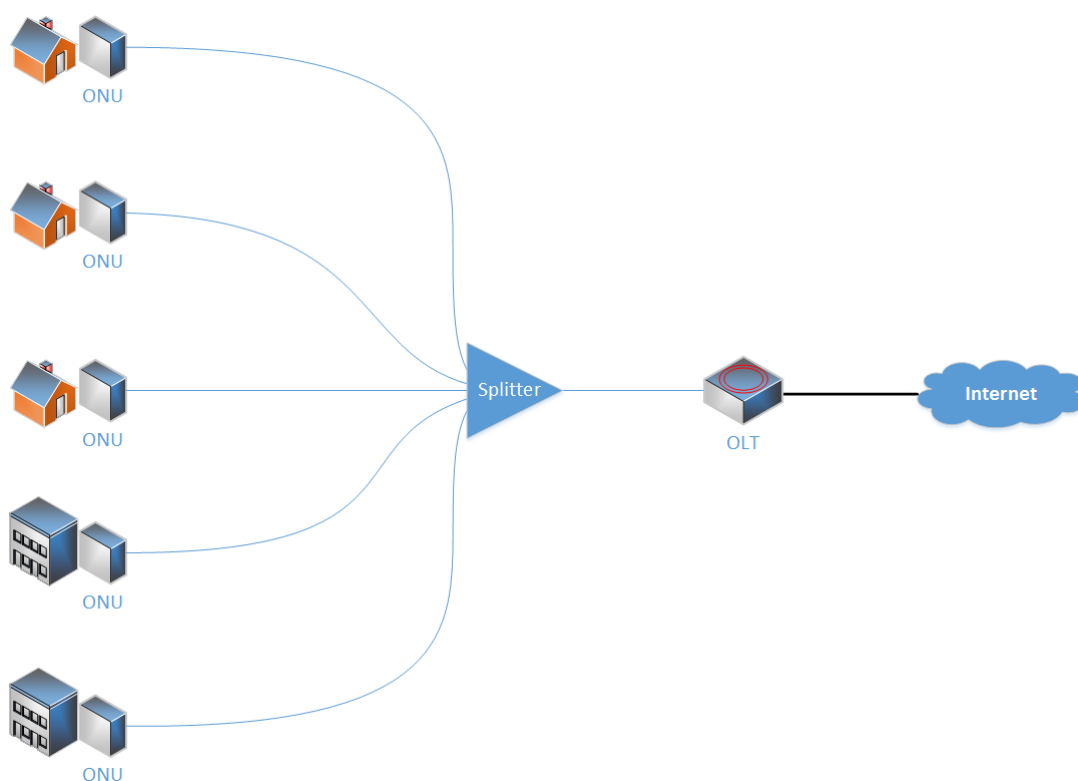
Po popisu přenosové vrstvy následuje představení aktivace ONU jednotky, kterou popisuje kapitola třetí. Tato kapitola vysvětluje průchod ONU jednotky jednotlivými stavy souvisejícími s aktivací ONU jednotky včetně řešení možných komplikací, které mohou nastat jak při aktivaci, tak v běžném provozu ONU jednotek.

Čtvrtá kapitola se zabývá algoritmy pro dynamické přidělování šířky pásma. Je zde popsána funkce těchto algoritmů a jejich dělení z hlediska získávání informací o obsazenosti front ONU jednoty. Kapitola dále obsahuje popis dvou DBA algoritmů včetně detailního popisu referenčního modelu DBA algoritmu XG-PON dle G.987.3.

Následující kapitola obsahuje simulaci triple play služeb v XG-PON síti se dvěma simulačními schématy v simulačním programu NS-3. Simulační schémata porovnávají rozdíly vlastností sítí při použití základního DBA algoritmu a při použití propracovanějšího DBA algoritmu. Obsažena je také modifikace GIANT DBA algoritmu zaměřující se na snížení zpoždění při přenosu dat přes XG-PON síť. Modifikace je následně ověřena simulací.

# 1 FYZICKÁ VRSTVA

XG-PON (Next Generation–Passive Optical Network), tedy 10 Gigabitová pasivní optická síť, byla již od začátku vyvíjena s požadavkem na zachování kompatibility se starší variantou GPON (Gigabit Passive Optical Network), jejichž přenosové rychlosti se brzy stanou nedostačující. XG-PON síť se skládá z centrální jednotky zvané OLT (Optical Line Terminal) a k ní připojených ONU (Optical Network Unit) jednotek, jedná se tedy o síť typu P2MP (Point-to-Multipoint). Optická síť mezi těmito jednotkami se nazývá ODN (Optical Distribution Network). Topologie propojení je nejčastěji stromová, kde se využívají k větvení tzv. pasivní optické rozbočovače (splitter). Jednoduchý příklad zapojení této topologie je uveden na obr. 1.1



Obr. 1.1: Příklad topologie XG-PON sítě

Dnes se lze setkat s označením NGA1 (Next Generation Access 1) a NGA2 (Next Generation Access 2). NGA1 je navržena tak, aby se dodržela zpětná kompatibilita. Tedy WDM (Wavelength Division Multiplexing) využívá jen z částí a hlavně využívá TDMA (Time Division Multiple Access). NGA2 počítá s plně nasazeným WDM v kombinaci s TDMA (Time Division Multiple Access), který by měl dosahovat sdílených rychlostí až 40 Gbit/s. Této rychlosti by se dosáhlo pomoci 4 vlnových délek po 10 Gbit/s, nebo 40 vlnových délek po 1 Gbit/s. Taková to změna vyžaduje zcela

nový návrh a koncepci, což způsobí znemožnění zpětné kompatibility s předchozími generacemi [1].

Médium pro přenos signálu v sítích další generace pasivních optických sítích tedy v ODN, je dle ITU-T G.652 doporučeno používat jednovláknové vlákno, které má nulovou disperzi na vlnové délce  $\lambda = 1310\text{ nm}$ . Doporučení také schvaluje použití oblasti  $\lambda = 1510\text{ nm}$ . Nicméně toto vlákno nemusí plně korespondovat s tímto doporučením, protože XG-PON sítě využívají  $\lambda = 1575 - 1580\text{ nm}$  pro sestupný směr a  $\lambda = 1260 - 1280\text{ nm}$  pro vzestupný směr. Signál se šíří v obou směrech, tedy ve vzestupném i sestupném směru v jednom optickém vláknu. Toto je možné díky použití techniky vlnového multiplexu WDM. Dle úmluvy vyjádření logické „1“ symbolizuje vysoká úroveň světelné emise. Naopak logickou „0“ symbolizuje nízká úroveň světelné emise. U XG-PON je pro oba směry použito NRZ (Non Return to Zero) kódování a pro zabezpečení přenosu dat se používá FEC (Forward Error Correction) kód. FEC kód dokáže kromě detekce chyby také opravit případnou chybu při přenosu dat přes ODN. XG-PON je kategorizován do dvou kategorií založených na rozdílné vzdálenosti. DD20 stanovuje maximální vzdálenost optického vlákna od OLT jednotky k ONU jednotce na 20 km a DD40 stanovuje maximální vzdálenost na 40 km. Standard G.987 dále specifikuje 4 třídy útlumu optické distribuční trasy, jedná se o Nominal 1, Nominal 2, Extended 1 a Extended 2. Konkrétní hodnoty těchto tříd jsou uvedeny v tab. 1.4 [2].

Rozbočovací poměry XG-PON sítě, tedy počet maximálně připojených ONU jednotek k jedné jednotce OLT, stanovuje standard G.987.1 na 1:256. Poměr 1:256 není ale limitující. Pomocí vhodné struktury připojení dílčích ONU je možné dosáhnout i většího poměru, a s porovnáním předchozí generace GPON, která měla maximální poměr 1:64. Větvení jednotlivých ONU jednotek může být provedeno několika způsoby. Na obr. 1.2 jsou graficky znázorněny 3 způsoby větvení definované standardem. Za předpokladu použití první topologie s  $n=1$  a  $m=64$  dostane dělicí poměr 1:64. Použitím dalších dvou příkladů topologií lze získat daleko větší poměr [3].

Jednoduchým příkladem lze ověřit, že i přenosová rychlost je dostačující pro tak vysoký poměr. Požadují-li se služby jako 2 nezávislé HD TV kanály s garantovanou přenosovou rychlostí 10 Mbit/s pro každý kanál. Jednu digitální telefonní přípojku s podporou video telefonie s garantovanou přenosovou rychlostí 512 kbit/s. Datové připojení k Internetu s garantovanou přenosovou rychlostí 8 Mbit/s s možností navýšení špičkové rychlosti až na 30 Mbit/s dle aktuálně dostupných přenosových prostředků. Všechny uvedené rychlosti jsou pro sestupný směr. Využije se tedy sumarizace a tím se získá celková garantovaná rychlost, která činí 28,512 Mbit/s, tedy 50,512 Mbit/s při špičkové rychlosti. Tato rychlost není konečná, musí se také vyhradit dostatečné prostředky pro přenos služebních a řídicích informací a zpráv, záhlaví a jiných uživatelsky neužitečných informací. Tuto nadbytečnost lze odhadnout na

zhruba na 4–10 Mbit/s. Při plném využití dělicího poměru, tedy 256 koncových uživatelů je sestupná přenosová rychlost pro každého uživatele rovna 39,1 Mbit/s, což je dle našeho příkladu dostačující [1].

Tab. 1.1: Parametry sítě XG-PON [2]

	sestupný směr		vzestupný směr		jednotka
<b>Pracovní vlnová délka</b>	1575 – 1580		1260 – 1280		<b>nm</b>
<b>Přenosová rychlost</b>	9,95328		2,48832		<b>Gbit/s</b>
<b>Bitová chybovost</b>	$10^{-12}$		$10^{-12}$		
<b>Disperze</b>	<b>DD20</b> 0 – 400	<b>DD40</b> 0 – 800	<b>DD20</b> 0 – -140	<b>DD40</b> 0 – -280	<b>ps/nm</b>

Tab. 1.2: Výkon vysílacího laseru [2].

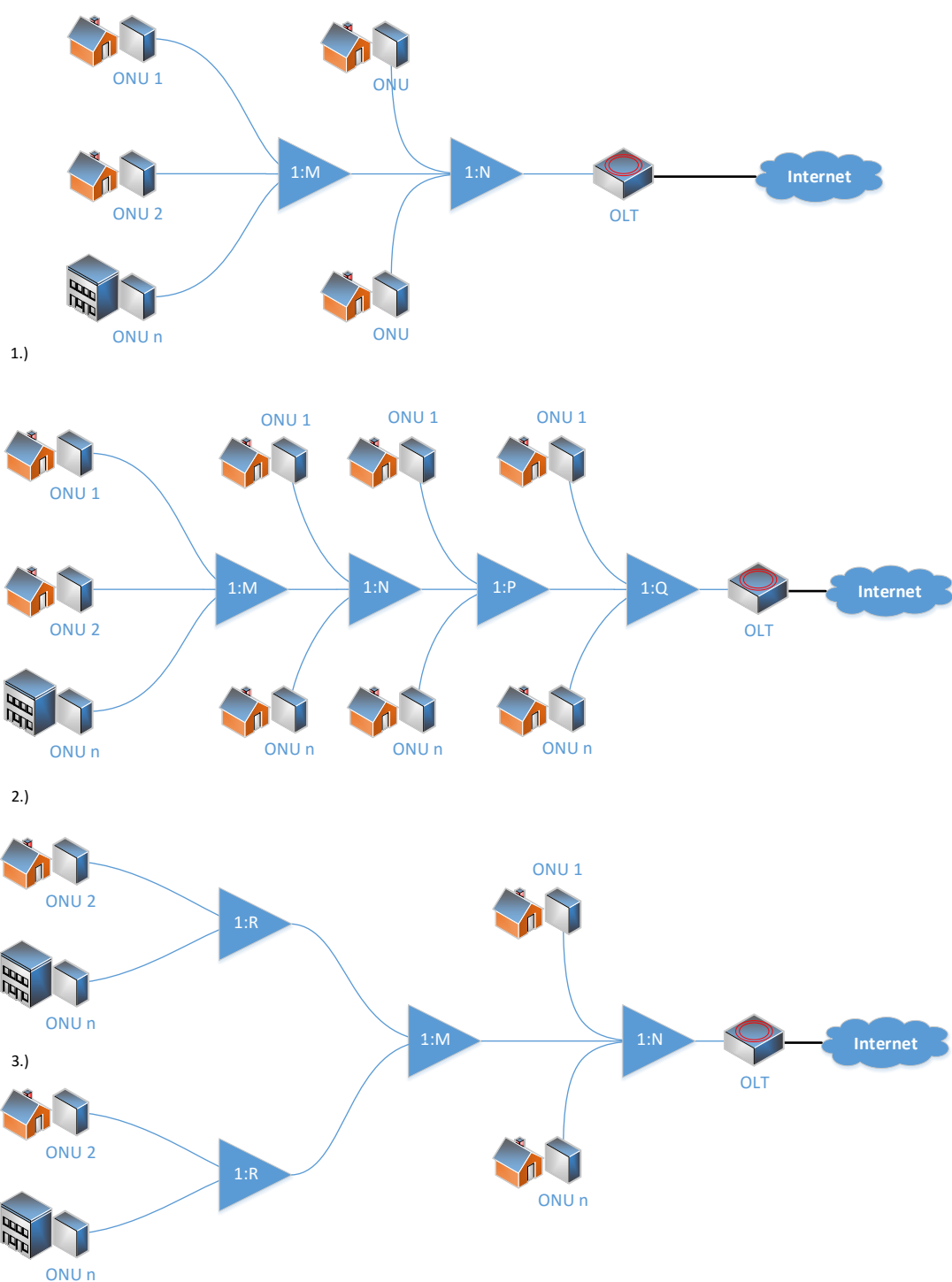
	<b>N1</b>	<b>N2</b>		<b>E1</b>	<b>E2</b>		jednotka
<b>ONU</b>	2 – 7	2 – 7		2 – 7	2 – 7		<b>dBm</b>
		<b>N2a</b>	<b>N2b</b>		<b>E2a</b>	<b>E2b</b>	
<b>OLT</b>	2 – 6	4 – 8	10,5 – 12,5	6 – 10	8 – 12	14,5 – 16,5	<b>dBm</b>

Tab. 1.3: Maximální výkon přijímacího paprsku [2].

	<b>N1</b>	<b>N2</b>		<b>E1</b>	<b>E2</b>		jednotka
<b>ONU</b>	–27,5	–29,5		–31,5	–33,5		<b>dBm</b>
		<b>N2a</b>	<b>N2b</b>		<b>E2a</b>	<b>E2b</b>	
<b>OLT</b>	–28	–28	–21,5	–280	–28	–21,5	<b>dBm</b>

Tab. 1.4: Hodnoty útlumových tříd ODN [2].

	<b>Nominal 1</b>	<b>Nominal 2</b>	<b>Extended1</b>	<b>Extended2</b>	jednotka
<b>Min útlum</b>	14	16	18	20	<b>dB</b>
<b>Max útlum</b>	29	31	33	35	<b>dB</b>



Obr. 1.2: Příklady větvení XG-PON sítě



## 2 PŘENOSOVÁ VRSTVA

Jedná se o vrstvu XGTC (XG-PON Transmission Convergence Layer) popsanou standardem ITU-T G.987.3. Je implementována na obou stranách, tedy jak v OLT jednotce, tak i v ONU jednotce. Tato vrstva specifikuje na jedné straně formátování datových jednotek SDU (Service Data Unit) a na straně druhé vhodné modulování optického signálu. XGTC vrstva se skládá z tří podvrstev [4]:

- XGTC adaptační podvrstva
- XGTC rámcová podvrstva
- XGTC PHY (Physical Interface) adaptační podvrstva

Pro sestupný směr má přenosová vrstva společně s PMD (Physical Medium Dependent) za úkol správně přenést tok dat rozdělený do rámců po  $125\mu s$ . Ve druhém směru, tedy ve vzestupném, se po nich požaduje přesně dlouhé časové shluky (bursts) [4].

### 2.1 XGTC adaptační podvrstva

XGTC adaptační podvrstva je zodpovědná za zapouzdření SDU, multiplexování a vymezení přenosu přes PON. Na straně vysílače se přijme SDU z vyšších vrstev obsahující uživatelská data a OMCI (ONU Management and Control Interface). Pro vytvoření XGEM (XG-PON Encapsulation Method) rámce přidělí tomuto SDU nebo fragmentu SDU, XGEM Port-ID a pokud je nastaveno zašifruje. Na straně příjemce se provádí opačný postup, tedy po přijetí XGEM rámce se rámec dešifruje (pokud je zašifrován), zkontroluje XGEM Port-ID a předá vyšší vrstvě [4].

### 2.2 XGTC rámcová podvrstva

XGTC rámcová podvrstva je zodpovědná za sestavení a rozbor hlaviček, které jsou nedílnou součástí funkce XG-PON managementu. Vrstva zpracovává XGTC výplň přijatou od XGTC adaptační podvrstvy, vytváří XGTC rámec pro sestupný směr a XGTC burst pro vzestupný směr. Dále vkládá do rámce administrativní a údržbové PLOAM zprávy [4].

### 2.3 XGTC PHY adaptační podvrstva

XGTC PHY adaptační vrstva na straně vysílače zastřešuje funkce, které modifikují modulaci toku bitů optickým vysílačem s cílem vylepšit detekci a zkreslení signálu

přeneseného přes optické médium. Dále vypočítává a přidává k rámcům pole obsahující FEC parity, stará se o kódování a časování výsledného bitového toku. Na straně příjemce provádí opačné operace těchto kroků [4].

## 2.4 Management XG-PON systému

O řízení a management se v XG-PON sítích starají tři kanály: embedded OAM (Operations, Administrations and Maintenance), PLOAM (Physical Layer Operations, Administrations and Maintenance) a OMCI (ONU Management Control Interface) [4].

Embedded OAM kanál nabízí cestu s velmi malou latencí díky přímému přiřazení informace konkrétnímu poli. Tento kanál se využívá pro časování PHY burst, alokace šířky pásma, výběr šifrovacího klíče a okamžité probuzení [4].

PLOAM kanál je založen na výměně zpráv a využívá vyhrazené pole v XGTC rámci a XGTC burst. Využívá ho PMD a XGTC management informace, které nejsou odeslané skrze embedded OAM kanál [4].

OMCI kanál využívají servisní vrstvy. V jednotce ONU je ve sestupném směru zodpovědný za filtrování a rozbalení XGEM rámců nesoucích OMCI zprávy a zapouzdření OMCI SDU ve vzestupném směru. V jednotce OLT je ve sestupném směru zodpovědný za filtraci a rozbalení XGEM rámců nesoucích OMCI zprávy a zapouzdření OMCI SDU z řídicí OMCI logiky do XGEM rámců pro transport do ONU jednotky [4].

### 3 AKTIVACE ONU JEDNOTKY

Aktivačním procesem ONU jednotky se rozumí procedury vykonávané při připojování neaktivní jednotky či obnovení funkcí ONU jednotky. V průběhu aktivačního procesu může ONU jednotka nabývat až 7 stavů. Pokud dojde k zapnutí ONU jednotky a spuštění počátečního stavu, ONU jednotka zatím nemůže vysílat data protože nemá nutné identifikátory. Pokud by začala vysílat pravděpodobně by narušila některý z časových rámců aktuálně používaných jinou ONU jednotkou a znehodnotila by zprávy druhé jednotce [3]. Aktivace ONU jednotky je graficky znázorněna pomocí vývojového diagramu na obr. 1.2.

#### 3.1 Initial state (O1)

První stav ONU jednotky po zapnutí je Initial State O1. Do toho stavu se jednotka dostane také po deaktivaci nebo po obnovení z emergency stop stavu (stav bude vysvětlen později). V tomto stavu se jednotka synchronizuje s OLT jednotkou pouze nasloucháním na médiu signálům v sestupném směru. K této synchronizaci se používá synchronizační automat, který využívá SFC (SuperFrame Counter) strukturu a pole PSync (Physical Synchronization Sequence) nalézající se v PSBd (Downstream Physical Synchronization block). PSync pole je synchronizační sekvence obsahující vždy stejný 64 bitový model. Aby došlo k synchronizaci je nutná shoda 64bit PSync a hodnota opravitelného SFC. Pro udržení synchronizace postačuje shoda 62bitů PSync a navýšenému SFC o 1 oproti předcházejícímu rámcí [4].

#### 3.2 Serial Number state (O2-3)

ONU přechází do stavu Serial Number state po úspěšné bitové a rámcové synchronizaci. V tomto stavu ONU jednotka nadále pouze naslouchá na médiu na pravidelné zprávy vysílané OLT jednotkou. Tyto pravidelně odesílané zprávy definují parametry pro připojení ONU k dané PON síti. Jakmile ONU přijme serial number grant se známým burst profilem je připravena vyslat XGTC rámec obsahující v hlavičce Serial Number ONU PLOAM zprávu a XGTC užitečné zatížení. Pomocí Serial number grant nabízí OLT jednotka volné kapacity vzestupného směru. Jelikož by mohla nastat situace, ve které by takto vytvořený rámec chtěla vyslat i jiná právě připojená jednotka, musí se náhodně vygenerovat čas 0 až 48 ms, po který ONU jednotka vyčká než rámec vyšle. Odesláním tohoto rámce ONU jednotka potvrdí výběr profilu.

OLT jednotka následně odpoví této ONU jednotce formou přiřazení ONU ID s hodnotou ALLOC ID a OMCI XGEM PORT ID. Po získání těchto hodnot přechází ONU jednotka do stavu Ranging state 04 [4].

### 3.3 Ranging state (O4)

V tomto stavu se vypočítává vyrovnávací zpoždění, které je po celou dobu komunikace stejné za předpokladu, že nenastane žádná změna v ODN. Vyrovnávací zpoždění slouží k vyrovnání rozdílných délek časů přenášení jednotlivých bitů přes médium na základě fyzických parametrů rozdílných vzdáleností ONU jednotek od OLT jednotky. Zpoždění vypočítává OLT jednotka a přidělí jej ONU jednotce vysláním ranging grantu společně se známým burst profilem. V přenášené zprávě je obsažena registrační PLOAM zpráva a XGTC doplněk. Po přidělení vyrovnávacího zpoždění předchází ONU jednotka do stavu Operation state (O5). Aby ONU jednotka nestrvala na vždy ve stavu Ranging state při výskytu chyby, figuruje v ní časovač TO1. Časovač TO1 představuje maximální dobu, ve které může ONU jednotka čekat na přidělení vyrovnávacího zpoždění. Výchozí hodnotou časovače TO1 je 10 s [4, 5].

#### 3.3.1 Výpočet vyrovnávacího zpoždění

OLT nejprve provede výpočet  $T_{eqd}$ , pomocí fyzických parametrů PON pomocí vzorce [3, 5]:

$$T_{eqd} \geq RspTime_{max} + (L_{min} + D_{max}) * \frac{n_{1577} + n_{1270}}{c}, \quad (3.1)$$

kde minimální délka vlákna  $L_{min}$  a maximální diferenciální délka vlákna  $D_{max}$ , délka vlákna  $L_i$  je potom [5, 4]:

$$L_{min} \leq L_i \leq L_{min} + D_{max} \quad (3.2)$$

Jedná se o hodnotu představující maximální dobu od vyslání PHY rámce až po přijetí PHY burst od nejvzdálenější ONU jednotky. Po změření hodnoty  $\Delta_{iRNG}$ , kterou OLT jednotka měří po vyslání synchronizačního rámce až do přijetí PHY burst, lze vypočítat výsledné vyrovnávací zpoždění pomocí vzorce [3, 5]:

$$E_q D_i = T_{eqd} - (\Delta_{iRNG} - \frac{StartTime}{R_{nom}}). \quad (3.3)$$

Vzorec lze zjednodušit, pokud známé vzdálenost OLT jednotky od ONU jednotky, takto [3, 5]:

$$E_q D_i = T_{eqd} - (RTD_i + RspTime_i). \quad (3.4)$$

Zde  $RTD_i$  (Round-Trip Delay) představuje dobu šíření optického signálu mezi OLT a ONU jednotkou v obou směrech. Hodnotu  $RTD_i$  je možno vypočítat vzorcem [3, 5]:

$$RTD_i = t_i^D + t_i^U = (n_1 270 + n_1 577) * \frac{L_i}{c}. \quad (3.5)$$

### 3.4 Operation state (O5)

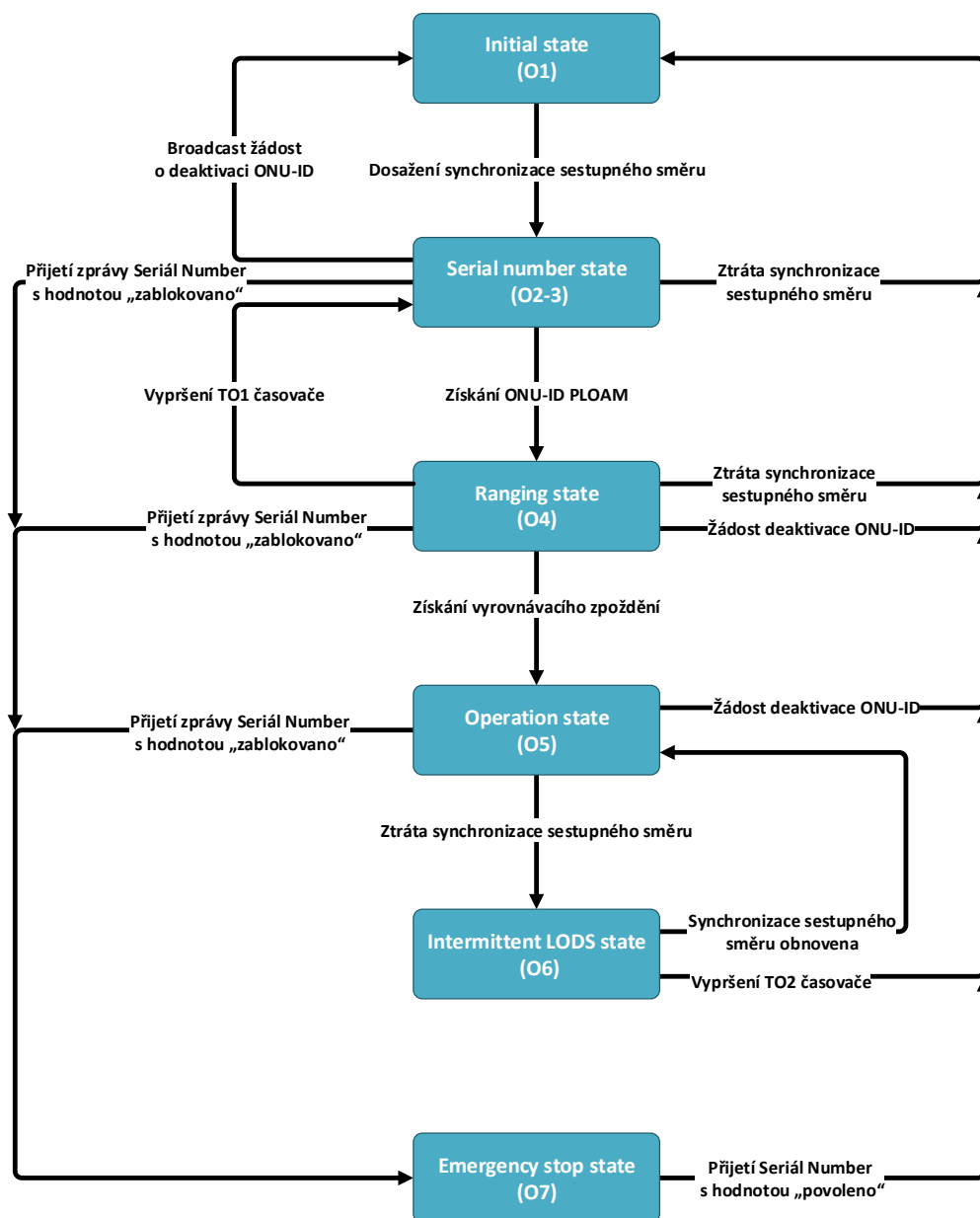
V tomto stavu již ONU jednotka plně využívá vyrovnávacího zpoždění. OLT jednotka a ONU jednotka komunikují vzájemně přes virtuální spoj, tedy přes vymezený prostor pro přenos dat. Dále může OLT jednotka kdykoliv požadovat autentizaci po ONU jednotkách. Výsledná autentizační metoda je pak zvolena OLT jednotkou [4].

### 3.5 Intermittent LODS state (O6)

Do toho stavu se ONU jednotka dostane při ztrátě synchronizace s OLT jednotkou. Společně se změnou stavu se aktivuje časovač TO2, který je v základu nastaven na 100 ms. Pokud je synchronizace obnovena, (došlo k přijetí rámce PSBd), před vypršením časovače TO2, vrátí se ONU jednotka do stavu Operation state (O5). Vyprší-li časovač TO2, ONU jednotka přejde do stavu Initial state (O1) [4].

### 3.6 Emergency Stop state (O7)

V tomto stavu se ONU jednotka ocitne po přijetí zprávu Disable Serial Number s hodnotou „zablokováno“. Dále ONU jednotka přestane vysílat a zahodí všechny TC parametry, včetně ONU-ID, Alloc-ID, základní XGEM Port-ID, burst profil, vyrovnávací zpoždění a šifrovací klíče. ONU jednotka sice nadále nemůže vysílat, ale stále přijímá rámce. Po přijetí zprávy Emergency stop s hodnotou „povoleno“, přejde ONU jednotka do stavu Initial state (O1) [4].



Obr. 3.1: Diagram aktivace ONU jednotky [4]

## 4 DYNAMIC BANDWIDTH ALLOCATION

DBA (Dynamic Bandwidth Allocation) je algoritmus mající za úkol v řádu milisekund dynamicky měnit vzestupnou šířku pásma. Aby bylo možné využívat společné médium pro více ONU jednotek, využívá se TDM. TDM rozdělí celé pásmo na několik časových intervalů. DBA má potom za úkol přidělit jeden nebo více takových to časových intervalů dílčím ONU jednotkám. K přidělení šířky pásma ONU jednotce používá OLT jednotka Bwmap zprávy. Tyto zprávy obsahují Alloc-ID, Start Time, Grant Size, DBRu a další pole. Alloc-ID pole slouží jako identifikátor ONU jednotky. Start Time pole označuje synchronizační čas, ve kterém ONU jednotka může začít vysílat data ve vzestupném směru. Grant size pole označuje množství přidělených dat pro konkrétní Alloc-ID pro vzestupný směr. DBRu slouží k povolení žádosti o data Alloc-ID v další vzestupném rámci. Ostatní pole slouží jiným operacím a údržbě [4]. Nabízené zatížení sítě pro každé Alloc-ID tedy  $R_L(t)$ , lze popsat vztahem

$$R_L(t) = \frac{B(t) + A(t, t + \Delta)}{\Delta} \quad (4.1)$$

kde  $B(t)$  je obsazenost logického bufferu v čase  $t$  a  $A(t, t + \Delta)$  představuje nově přicházející tok dat do bufferu během intervalu  $t, t + \Delta$  [4, 6, 7].

### 4.1 Získávání obsazenosti fronty ONU jednotek

Aby přidělování bylo spravedlivé a nedocházelo k přidělování šířky pásma jednotkám, které ji nevyužijí, pak potřebuje DBA algoritmus znát obsazenost front jednotlivých ONU jednotek. K tomu se využívá dvou metod zjišťování obsazenosti front ONU jednotek [4]:

1. Status reporting (SR)
2. Traffic monitoring (TM)

První metoda status reporting (SR) DBA vyžaduje spolupráci ONU jednotky, a to protože každá ONU jednotka posílá obsazenost své fronty v DBRu poli vzestupného XGTC rámce. Na základě obsazenosti front, OLT jednotka přidělí ONU jednotce šířku pásma. Druhá metoda TM nevyžaduje tuto spolupráci, protože sleduje tok dat ONU jednotky a na základě takto nasbíraných dat přiděluje šířku pásma. Tato metoda se v praxi většinou zaměřuje na GEM hlavičku, která indikuje nečinný rámec. Pro příklad, pokud ONU jednotka nemá žádné data k odeslání, odešle nečinný rámec během alokovačního intervalu. Porovnáním obou metod je vhodnější zvolit metodu druhou, tedy SR a to z důvodu, že má nižší zpoždění. V praxi většina DBA algoritmů implementuje SR metodu, naopak některé DBA algoritmy, jako například modifikovaný Max-Min Fair DBA popisovaný dále v textu, využívají kombinaci obou metod zároveň [4, 8, 9].

## 4.2 Referenční model DBA

Garantovaná šířka pásma  $R_G^i(t)$  může být informován na základě fixed šířky pásma a assured šířky pásma. Další šířka pásma může být jakákoliv non-assured forma,  $R_{NA}^i(t)$ , nebo best-effort,  $R_{BE}^i(t)$  [4].

Guaranteed šířka pásma se skládá ze staticky definované velikosti. Assured šířka pásma je přidělena dynamicky na základě nabízeného zatížení pro specifické Alloc-ID. Pro přidělování additional (dodatečné) šířky pásma model zajišťuje dva kritéria, tedy rate-proportional a kritérium založené na poskytování priority a vah [4].

Model striktně definuje hierarchii priorit přidělované šířky pásma [4].

1. Fixed šířka pásma (nejvyšší priorita)
2. Assured šířka pásma
3. Non-assured šířka pásma
4. Best-effort šířka pásma (nejnižší priorita)

OLT by jako první měla přidělit šířku pásma s nejvyšší prioritou, tedy statickou šířku pásma všem Alloc-ID, navzdory jejich individuálním požadavkům na zátěž sítě a celkové zátěži PON. Poté OLT provede výpočet guaranteed šířky pásma pro každou OLT jednotku. Přidělená hodnota nesmí překročit maximální level  $R_A$  a také se nepřiděluje hodnota větší než je požadavek OLT jednotky. Poté OLT jednotka začne přidělovat non-assured šířku pásma každé ONU jednotce, dokud nevyčerpá všechny přebytek volné šířky pásma nebo tak, aby každá dosáhla nasycení. V posledním kroku alokuje best-effort šířku pásma ONU jednotkám, které ještě nejsou nasycené [4, 10].

Non-assured šířka pásma označována jako  $R_{NA}$  je forma dodatečné šířky pásma, které OLT jednotka může dynamicky přidělit ONU jednotce na základě fixní a assured šířky pásma. Velikost nadbytečné šířky pásma, která se může přidělit jako non-assured šířka pásma, je rovna části uplink capacity, která se přiděluje [4].

T-CONT typ 1 představuje stálou šířku pásma. T-CONT typ 2 zajišťuje jistou šířku pásma. T-CONT typ 3 podporuje jistou a nejistou šířku pásma, současně nabízí lepší služby než best-effort pomocí garantovaného minima šířky pásma a přebytku šířky pásma přiděleného pouze na požádání. T-cont typ 4 představuje nejnižší prioritu, podporuje best-effort služby jako prohlížení webu, FTP a SMTP. T-CONT typ 5 je kombinací dvou tříd z ostatních 4 typů T-CONT pro vymazání specifikací z MAC kontroléru cíleného T-CONT během přidělování přístupu [11, 4].

Aby přidělování bylo spravedlivé a nepřidělovala se šířka pásma ONU jednotkám, které ji nevyužijí, využívá se dvou metod zjišťování obsazenosti front ONU jednotek. První metoda status reporting (SR) DBA vyžaduje spolupráci ONU jednotky, to protože každá ONU jednotka posílá obsazenost své fronty v DBRu poli. Na základě obsazenosti front, OLT jednotka přidělí ONU jednotce šířku pásma. Druhá metoda



traffic monitoring (TM) nevyžaduje tuto spolupráci, protože sleduje tok dat ONU jednotky a na základě takto nasbíraných dat přiděluje šířku pásma. Většinou se zaměřuje na GEM hlavičku, která indikuje nečinný rámec. Pro příklad, pokud ONU jednotka nemá žádné data k odeslání, odešle nečinný rámec během alokovacího intervalu. Na rozdíl od první metody má tato metoda větší zpoždění [4].

SImax (Service Interval) a SImin představují maximální a minimální interval služby. Používají se k výpočtům časovačů, které se starají o žádání šířky pásma. ABmin a ABsur reprezentují minimální a přebytečné alokační byty. MAC kontrolér dále zajišťuje, že nebude alokovaná větší šířka pásma než kapacita linky [4, 11].

OLT obsahuje několik front označených pomocí AllocID. ONU jednotkám pak může přidělit jednu nebo i více AllocID. Přidělením několika AllocID vytvoří jeden logický zásobník [4].

### 4.3 Modifikovaný Max-Min Fair DBA pro XG-PON

Jedná se o modifikaci Max-Min fair algoritmu implementovaného v předchozí generaci PON sítí, tedy G-PON. Modifikace byla potřebná, protože přímá implementace do XG-PON sítě představovala příliš velké zpoždění. Algoritmus kombinuje obě metody získávání obsazenosti fronty ONU jednotky. Tedy jak monitorování toku dat (traffic monitoring–TM), tak i odesílání obsazenosti fronty (status reporting–SR) danou ONU jednotkou. Taková to kombinace je výhodná v tom, že se nepřenáší tolik režijních dat má menší zpoždění a jitter. Další výhodu přináší v tom, že pokud by ONU jednotka neodeslala burst a tedy ani obsazenost fronty, tak by OLT jednotka neměla konsistentní informace u všech obsazeností front ONU jednotek. Hlavním klíčem algoritmu je přidělení celé volné kapacity vzestupného směru [12].

Výpočet přidělené šířky pásma se provádí v několika krocích. Nejdříve se setřídí požadovaná kapacita jednotlivých ONU jednotek v rostoucím směru a nastaví se GrantSizes na nulu. V prvním kroku se vypočte dostupnou šířku pásma pomocí vzorce [12]:

$$B_L = \frac{BW - \sum_{k=1}^m W_t^k}{|S|}$$

kde  $\mathbf{BW}$  je součet všech vzestupných burstů,  $m$  je celkový počet ONU jednotek a  $|S|$  je roven  $S$ . V kroku číslo dvě se pro všechny ONU v  $S$  obnoví GrantSizes dle [12]

$$W_t^k = \min R_t^k W_t^k + B_L.$$

Ve třetím kroku se z  $S$  odstraní všechny ONU jednotky, které plně obslouženy a platí [12]

$$W_t^k = R_t^k.$$

V posledním kroku tedy čtvrtém, se zjistí zda v  $|S|$  zůstala nějaká ONU jednotka. Pokud zůstala opakuje se postup od kroku číslo jedna, pokud je  $|S|$  prázdné ukončí se cyklus [12].

1. **Fixed Bandwidth:** Rezervovaná část kapacity, spojení nebere v potaz vyžádání ani aktuální vytížení linky
2. **Assured Bandwidth:** Část kapacity spojení, která je alokovaná vyžádanému toku dat
3. **Non-Assured Bandwidth:** Další šířka pásma, kterou OLT dynamicky přiděluje v podílu s celkovou garantovanou šířkou pásma ONU jednotky
4. **Best Effort Bandwidth:** Šířka pásma, kterou OLT dynamicky přiděluje v podílu s celkovou negarantovanou šířkou pásma ONU jednotky

**Fixed Bandwidth** má největší prioritu. Využívá se pro služby náchylné na přenosové parametry sítě, jako je například VoIP. Naopak **Best Effort** má nejnižší prioritu. Využívá se pro služby nevyžadující perfektní přenosové parametry sítě. XG-PON klasifikuje obě Fixed i Assured šířky pásma jako Guaranteed bandwidth a ostatní jako negarantované šířky pásma. Přidělení jednotlivých šířek pásem jednotlivým T-CONT [12]:

1. T-CONT T1 : fixed bandwidth
2. T-CONT T2 : assured bandwidth
3. T-CONT T3 : assured & non-assured bandwidth
4. T-CONT T4 : best-effort bandwidth

## 4.4 GIANT (GigaPON Access Network) DBA

Byl vyvinut v roce 2006. Jedná se o DBA algoritmus, který byl jako první fyzicky implementovaný. Obsahuje T-CONT 1, 2, 3 a 4. Algoritmus používá minimum AB hodnot ABmin a maximum služebních intervalů SImax pro T1, T2 dotazování T4 a assured část T3. Hodnoty ABSur a SImin (Service Interval) jsou použity pro T4 a non-assured část T3. Každé vypršení časovače SI vyvolá alokaci AB pro korepondující T-CONT [13, 14]. V roce 2008 byl GIANT rozšířen o IA (Immediate Allocation). Pro zvýšení periody přidělování grantu. IA používá dodatečný parametr  $V B(j)$ , tedy čítač dostupných bytů. Další vylepšení GIANT algoritmu přišlo v roce 2013 jako EBU. Jednalo se konkrétně o modifikaci IA. Vylepšení spočívalo v tom, že se algoritmus naučil používat záporné hodnoty  $V B(j)$ . Změna umožňuje využití přebytečné vzestupné kapacity T-CONT přidělit podobnému T-CONT typu. Dále EBU představuje  $S_k$ , kde [13]

$$S_k = \sum_{j \in Z} V B(j)$$

$$with Z = \{i \mid V B(i) > 0, servicetimer(i) = 0, queue(i) \in TCONTtypek\}$$

Po přepočítání  $S_k$  na konci každého alokačního cyklu, pro každé T-CONT, EBU vloží vysoké číslo hlavičky pro podporu XG-PON. Navíc se ještě více zvětšila perioda přidělování grantu. Jak se v praxi ukázalo s porovnáním IA a EBU bylo zrychlení desetinásobné [13, 14].

#### 4.4.1 GIANT MAC (Medium Acces Controller)

Tento algoritmus je implementovaný v modulu XG-PON pro NS-3. Zkratka MAC představuje srdce gigabit PON, tedy jednotku, která rozhoduje o počtu uživatelů přistupujících do XG-PON sítě. TCON-T 1 nepoužívá DBA, je ihned přidělen ONU jednotce. TCON-T 2–4 vychází z metody rezervace, jsou přiřazeny jedině, když je reportována ne prázdná fronta. Když je aktivováno nové AllocID, modul managementu zdrojů implementovaný v OLT jednotce zkontroluje dostupnost potřebných zdrojů. Dále ověří zda nedošlo k přečerpání systémové kapacity garantováním servisní rychlosti pro všechny AllocID. Na základě T-CONT typu, vypočítá 4 servisní parametry:

1. **SImax**: Maximální servisní interval
2. **SImin**: minimální servisní interval
3. **ABmin**: Minimum alokovaných bytů
4. **ABsur**: Přebytek alokovaných bytů

Garantovaná servisní rychlost je rovna  $\mathbf{ABmin/SImax}$ , kde přebytek (ne garantovaná) servisní rychlost je rovna  $\mathbf{ABsur/SImin}$ . Součtem garantované a přebytkové rychlosti získáme maximální dovolenou rychlost pro T-CONT 3, když pro TCONT 4 SImax je dotazovací perioda pokud ABmin je totožné s délkou reportovací zprávy DBRu. Algoritmus nejdříve alokuje garantovanou šířku pásma a poté přebytkovou, pokud je ještě stále místo v rámci [14].

#### Fáze alokace garantované šířky pásma

Pro každou každou onu jednotku je postupně zjištěno zda SImax timer je roven jedné. Pokud to platí, alokuje se garantovaná šířka pásma a SImax timer se na staví na hodnotu SImax. Pokud podmínka neplatí, SImax timer se sníží o jedna [14].

#### Proces alokace garantované šířky pásma

Nejdříve je zjištěno zda je T-CONT je typu 1 nebo 4 a dle rozhodnutí se alokuje počet bytů odpovídající hodnotě ABmin. Pokud zpracováváný T-CONT není typu 1 ani 4 tak alokována šířka pásma je rovna  $\min(\mathbf{ABmin}, \mathbf{Request(i)})$ , rámcové bajty se zmenší o alokované bajty stejně jako byl požadavek [14].

## Fáze alokace přebytečné šířky pásma

Na začátku je zkontrolováno zda se jedná o T-CONT 3 nebo 4 a následně zda SImin timer je větší než 1. Pokud tato podmínka platí tak se nejdříve sníží SImin timer o 1. Dále pokud je počet rámcových bajtů roven nule tak se určí ukazatel startu TCONT 3 tak, že k aktuálnímu ukazateli startu TCONT 3 se přičte pořadí AllocID a následně se odečte jednička. Dále uvažujeme, že N je rovno ukazateli startu TCONT 3 a že i je rovno aktuální iteraci procházení všech AllocID. Pokud TCONT (N+i) po přičtení jedničky k ukazateli startu TCONT 3 typu 3 a zároveň další požadavek je větší než nula a při tom SImin další časovač je roven nule tak se alokuje přebytečná šířka pásma [14].

Pro T-CONT 4 zvolíme na začátku L, které je rovno ukazateli startu TCONT4. Pokud je rámec bajtů roven nule tak ukazatel startu T-CONT 4 je roven součtu L a pořadí aktuálně prováděné iterace nad všemi AllocID je snížena o 1. Pokud neplatí tak když následující T-CONT je roven 4 a zároveň následující požadavek je větší než nula a při tom následující SImin časovač je roven nule tak se alokuje přebytečná šířka pásma. Ta je rovná  $\min(\text{ABsur}, \text{Request}(i), \text{Rámec bajtů})$ . Dále se ještě nastaví SImin časovač na hodnotu SImin. Poté se od rámce bajtů odečte alokované bajty. Nakonec se ještě od požadavku odečte o alokované bajty [14].

## 5 SIMULACE V NS-3

Tato kapitola se věnuje simulacím XG-PON sítě se dvěma simulačními schémata. Schémata využívají principiálně stejné topologie sítě, pouze u druhého schématu jsou účastnická zařízení rozdělena na 3 podle typu používané služby. Hlavní rozdíl mezi těmito schémata je v použitém DBA algoritmu. První schéma využívá round robin DBA. Toto schéma představuje využití minimální „intelligence“ DBA, tedy velmi jednoduše řečeno rozděluje šířku pásma jednotlivým ONU jednotkám na požádání a hlídá překročení povolené šířky pásma. Druhé schéma využívá GIANT DBA, který byl popsán výše.

Pro zhotovení simulace byl použit manuál k NS-3 společně s [16].

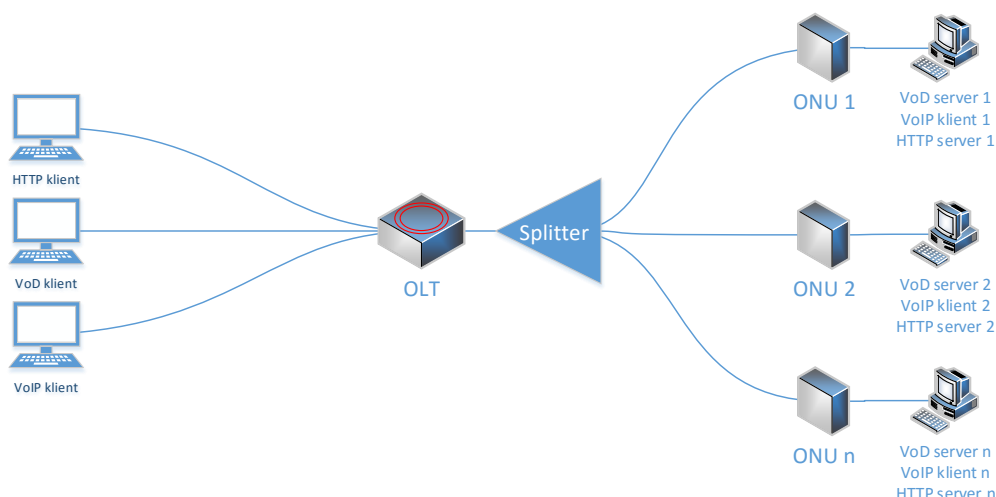
### 5.1 Simulační topologie XG-PON

Pro simulaci triple play služeb v XG-PON byl zvolen simulační program NS-3 z důvodu dostupnosti balíčku pro XG-PON sítě. Balíček rozšiřuje NS-3 o možnost simulací XG-PON prvků a tedy i sítě jako takové. Díky tomuto balíčku lze vytvořit uzel, ke kterému se připojí XG-PON síťová karta. Balíček se nezaměřuje na simulaci fyzické vrstvy. Není tedy možné uvažovat například různé vzdálenosti mezi OLT a ONU jednotkami nebo fyzikální vlivy působící na optické vlákno.

V simulaci byly použity 3 na sobě nezávislé služby jako HTTP (Hypertext Transfer Protocol), VoD (Video on Demand) a VoIP (Voice over IP). Topologie sítě sestává z jedné OLT jednotky a několika ONU jednotek. K OLT jednotce je na straně internetové připojena skupina tří serverů, kdy každý z nich obsluhuje pouze jednu ze tří služeb. Tato skupina serverů je k OLT jednotce připojena pomocí linky o rychlosti 1 000 Mb/s se zpožděním 2 ms. Na klientské straně OLT jednotky je připojeno několik ONU jednotek. K těmto ONU jednotkám je dále připojeno 1 klientské zařízení, které zde simuluje roli koncového zařízení zákazníka. Toto zařízení jinak řečeno uzel, je k ONU jednotce připojeno stejnou linkou jako servery k OLT, a to linkou o rychlosti 1 000 Mb/s se zpožděním 2 ms. Celková zátěž sítě se tedy přenáší přes XG-PON. OLT jednotka využívá síť 10.0.0.0 s maskou sítě 255.255.0.0. ONU jednotky spadají do sítě 172.0.0.0 s maskou 255.255.255.0. Graficky je topologie zobrazena na obr. 5.1.

### 5.2 Popis generovaného toku dat

Jak již bylo výše zmíněno simulace využívá 3 typů toku dat. Tyto služby z principu vytěžují několikanásobně více sestupný směr než vzestupný. To protože u VoD služby



Obr. 5.1: Topologie simulované sítě

klient pouze žádá o zaslání videa. Požadavek se pohybuje v řadech desítek kb, kdežto samotné video využije šířku pásma v řadech desítek MB. U VoIP je poměr objemu dat sestupného a vzestupného směru stejný. To z důvodu, že oba klienti mohou zároveň mluvit i poslouchat. DBA algoritmy se uplatňují pouze pro vzestupný směr, proto v této simulaci nebude tak důležitý sestupný směr, ale směr vzestupný a proto na straně klientů XG-PON sítě jsou umístěny servery a klienti budou umístěni na straně serverů. Všechny aplikace se spustí v čase 0 a ukončují se všechny společně s koncem simulace v čase 10 s.

### 5.2.1 Video On Demand

VoD aplikace v sestupném směru žádá o obsah, při tom generuje datový tok o velikosti 100 kb/s. VoD aplikace ji odesílá obsah ve vzestupném směru a generuje při tom datový tok o velikosti 10 Mb/s. V NS-3 se vytvoření aplikace na jednom uzlu vytvoří pomocí následujícího kódu 5.1.

Kód 5.1: VoD aplikace

```

1 OnOffHelper onOffVod ("ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress (Ipv4Address (
2   p2pSInterfaces [1]. GetAddress (0)), 1234));
3 onOffVod.SetAttribute ("OnTime", StringValue ("ns3::ConstantRandomVariable [Constant=1000]"));
4 onOffVod.SetAttribute ("OffTime", StringValue ("ns3::ConstantRandomVariable [Constant=0]"));
5 onOffVod.SetAttribute ("DataRate", DataRateValue (DataRate (dataRate_vod)));
6 onOffVod.SetAttribute ("PacketSize", UIntegerValue (packetSize));
7 onOffVod.SetAttribute ("MaxBytes", UIntegerValue (maxBytes_vod));
8
9 onuApps.Add (onOffHttp.Install (clientNodes.Get (i)));

```

Pomocí ns3::UdpSocketFactory je definován transportní protokol UDP výsledné aplikace. Funkcí p2pSInterfaces[1].GetAddress(0) a následnou definicí portu 1234,

dojde k nastavení cíle generovaného datového toku na interface serveru pro službu VoD. Funkce `onOffVod.SetAttribute()` slouží k nastavování atributů. Prvními dvěma nastavovanými atributy se definuje časy provozu aplikace. Čas vypnutí (`OffTime`) se nastaví na 0, což znamená, že se aplikace nikdy nevypne. Aplikace se nevypíná z důvodu generování konstantního datového toku. Aplikace se vždy spustí ihned. `OnTime` říká aplikaci, kdy se má znovu zapnout. Jelikož aplikace nebude v době simulování vypnuta, nastaví se hodnota na co největší, například na hodnotu 1000. Dále se nastaví rychlost generovaného datového toku *DataRate* a velikost paketu *PacketSize*. Poslední nastavovaný atribut je `MaxBytes`, kterým lze definovat maximální počet vygenerovaných bajtů, jakmile je tato hodnota dosažena, aplikace se vypne. Tento atribut je nastaven na nulu, což zapříčiní nepřetržité generování datového toku.

Poslední funkce v kódu 5.1 slouží, k instalaci takto definované aplikace na klientský uzel. Podle počtu ONU jednotek respektive klientských uzlů se postupnými iteracemi smyčkou `for` nainstaluje na všechny klientské uzly.

Kód 5.2: VoD sink

```

1 PacketSinkHelper packetSinkVod ( "ns3::UdpSocketFactory", InetSocketAddress (Ipv4Address
2 (p2pSInterfaces [1].GetAddress (0)), 1234));
3 oltApps.Add (packetSinkVod.Install (serverNodes.Get (1)));

```

Na straně serveru je vytvořen tzv. sink, který simuluje příjem VoD dat. Kód 5.2 slouží k vytvoření zmíněného sinku. Obdobný sink pouze se změněnou adresou je také vytvořen na klientském uzlu, a simuluje funkci příjmu režijní dat pro VoD.

## 5.2.2 Voice Over IP

VoIP aplikace generuje při přenosu hlasu a signalizačních dat v sestupném směru stejný datový tok jako ve směru vzestupném, o celkové velikosti v jednom směru 512 kb/s. V simulačním programu NS-3 se aplikace vytvoří obdobným způsobem jako VoD aplikace, rozdílem je cíl odesílaných dat a přenosová rychlost.

## 5.2.3 Hypertext Transfer Protocol

HTTP aplikace generuje pouze provoz ve vzestupném směru o velikosti 1 Mb/s. Důvodem proč aplikace negeneruje také tok v sestupném směru představující žádosti o webové stránky je, že NS-3 vytvoří k již vytvořenému TCP spojení druhé TCP spojení. Jak je známo TCP si při vytváření spojení vymění režijní data mezi serverem a klientem a tím nám zanechá do simulace nepřesnosti. V simulačním programu NS-3 se aplikace vytvoří obdobným způsobem jako VoD aplikace, rozdílem je cíl odesílaných dat, přenosová rychlost a použití TCP transportního protokolu.

## 5.3 Simulace

### 5.3.1 Simulace bez DBA

V prvním simulačním schématu se využívá tak zvaně round robin DBA algoritmu. Přiřazovaná šířka pásma neuvažuje žádné váhování a neobsahuje ani žádné vážené fronty. Pokud ONU jednotka reportuje obsazenost fronty a je dostupná volná šířka pásma, tak je ji přidělena potřebná šířka pásma. Pro přidělování šířky pásma se používá jednotka *slovo*, anglicky *word*.

$$1 \text{ slovo} = 4 \text{ bajty} \quad (5.1)$$

Základ obou simulačních schémat je XG-PON síť a na ní jsou aplikované DBA algoritmy. Pro správnou funkčnost je XG-PON uzlům, tedy OLT a ONU jednotkám přiřadit IP adresy. Nejdříve je potřeba definovat parametry, pomocí kterých lze poté automatizovaně přiřadit IP adresy. Použije se pro to *XgponHelper* a *xgponConfigDb*, jak je zobrazeno v kódu 5.3. Řádky 4–7 tohoto kódu slouží k nastavení prvního bajtu IP použitých IP adres společně s nastavením prefixu masky sítě pro použité OLT a ONU jednotky.

Kód 5.3: Nastavení generátoru IP adres pro XG-PON uzly

```
1 XgponHelper xgponHelper;  
2 XgponConfigDb& xgponConfigDb = xgponHelper.GetConfigDb ( );  
3  
4 xgponConfigDb.SetOltNetmaskLen (16);  
5 xgponConfigDb.SetOnuNetmaskLen (24);  
6 xgponConfigDb.SetIpAddressFirstByteForXgpon (10);  
7 xgponConfigDb.SetIpAddressFirstByteForOnus (172);
```

Pro následné přiřazení IP adres je využito *Ipv4AddressHelper*, kde využijeme předem nadefinované údaje pomocí *xgponHelper*. V kódu 5.4, lze také vidět, že přiřazení v posledním kroku probíhá postupnou iterací přes všechny ONU jednotky včetně OLT jednotky.

Kód 5.4: Přiřazení IP adres uzlům

```
1 Ipv4AddressHelper addressHelper;  
2 Ptr<XgponOltNetDevice> tmpDevice = DynamicCast<XgponOltNetDevice, NetDevice>  
3 (xgponDevices.Get(0));  
4 std::string xgponIpbases = xgponHelper.GetXgponIpAddressBase ( );  
5 std::string xgponNetmask = xgponHelper.GetOltAddressNetmask ();  
6 addressHelper.SetBase (xgponIpbases.c_str(), xgponNetmask.c_str());  
7  
8 Ipv4InterfaceContainer xgponInterfaces = addressHelper.Assign (xgponDevices);  
9  
10 Ipv4InterfaceContainer xgponInterfaces = addressHelper.Assign (xgponDevices);  
11 for (int i=0; i<(nOnus+1);i++)  
12 {  
13     Ipv4Address addr = xgponInterfaces.GetAddress(i);  
14     Ptr<XgponNetDevice> tmpDevice = DynamicCast<XgponNetDevice, NetDevice> (xgponDevices.Get(i));  
15     tmpDevice->SetAddress (addr);  
16     if(verbose)  
17     {  
18         if(i==0) std::cout << "OLT IP Adresa: ";
```



```

19 |         else std::cout << "ONU_" << (i-1) << "_IP_Adresa: ";
20 |         addr.Print(std::cout);
21 |         std::cout << std::endl;
22 |     }
23 | }

```

Poté je potřeba přiřadit IP adresy mezi ONU jednotkou a klientskými zařízeními, respektive mezi OLT jednotkou a servery. Pro přiřazení IP adres se nadefinuje přiřazovaná síť pomocí řádků 3, 4 a 5 kódu 5.5. Samotné přiřazení IP adresy k uzlům se provede pomocí řádku 7. Pro přiřazení IP adres všem ONU jednotkám a klientským zařízením je potřeba provést tento kód na všech zařízeních, to se provede pomocí smyčky for. Přiřazení IP adres jednotce OLT a serverům se provede obdobně, pouze s rozdílem získání přiřazovaných sítí. Získání přiřazovaných parametrů IP adres je zobrazeno v kódu 5.6.

Kód 5.5: Přiřazení IP adres ONU jednotkám a klientským zařízením

```

1 | for(int i=0; i<nOnus; i++)
2 | {
3 |     std::string clientIpbases = xgponHelper.GetIpAddressBase (160, i, 24);
4 |     std::string clientNetmask = xgponHelper.GetIpAddressNetmask (24);
5 |     addressHelper.SetBase (clientIpbases.c_str(), clientNetmask.c_str());
6 |
7 |     p2pCInterfaces[i] = addressHelper.Assign (p2pCDevices[i]);
8 | }

```

Kód 5.6: Získání parametrů pro přiřazení IP adresy OLT jednotce a serverům

```

1 | for(int i=0; i<nOnus; i++)
2 | {
3 |     std::string clientIpbases = xgponHelper.GetIpAddressBase (160, i, 24);
4 |     std::string clientNetmask = xgponHelper.GetIpAddressNetmask (24);
5 |     addressHelper.SetBase (clientIpbases.c_str(), clientNetmask.c_str());
6 |
7 |     p2pCInterfaces[i] = addressHelper.Assign (p2pCDevices[i]);
8 | }

```

V každém schématu je potřeba přiřadit každé ONU jednotce AllocID. To je provedeno kódem 5.7. Nejdříve je získán ukazatel na OLT jednotku a ten je převeden z typu XgponOltNetDevice na klasický NetDevice používaný v základním NS-3. Obdobným způsobem je získán ukazatel na ONU jednotku, které se bude přiřazovat AllocID. V posledním kroku se provede přiřazení AllocID.

Kód 5.7: Přiřazení ONU jednotkám AllocID

```

1 | Address addr = p2pCInterfaces[i].GetAddress(0);
2 | Ptr<XgponOltNetDevice> oltDevice = DynamicCast<XgponOltNetDevice, NetDevice> (
3 | xgponDevices.Get(0));
4 | Ptr<XgponOnuNetDevice> onuDevice = DynamicCast<XgponOnuNetDevice, NetDevice> (
5 | xgponDevices.Get(i+1));
6 |
7 | uint16_t allocId = xgponHelper.AddOneTcontForOnu (onuDevice, oltDevice);

```

Pro správnou funkčnost je ještě potřeba přiřadit port pro vzestupný a sestupný směr. Toto je provedeno kódem 5.8, kterému je ještě potřeba definovat adresu klientského uzlu.

### Kód 5.8: Přiřazení upstream a downstream portu

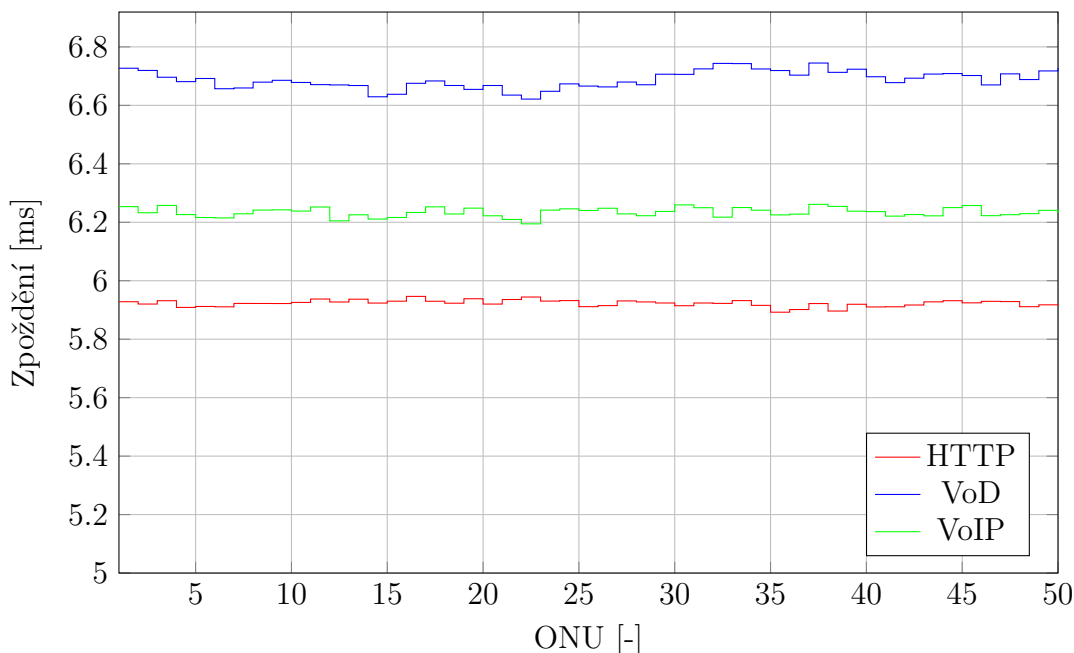
```

1 uint16_t upPortId = xgponHelper.AddOneUpstreamConnectionForOnu (
2 onuDevice, oltDevice, allocId, addr);
3 uint16_t downPortId = xgponHelper.AddOneDownstreamConnectionForOnu (onuDevice, oltDevice, addr);

```

## 5.4 Výsledek simulace

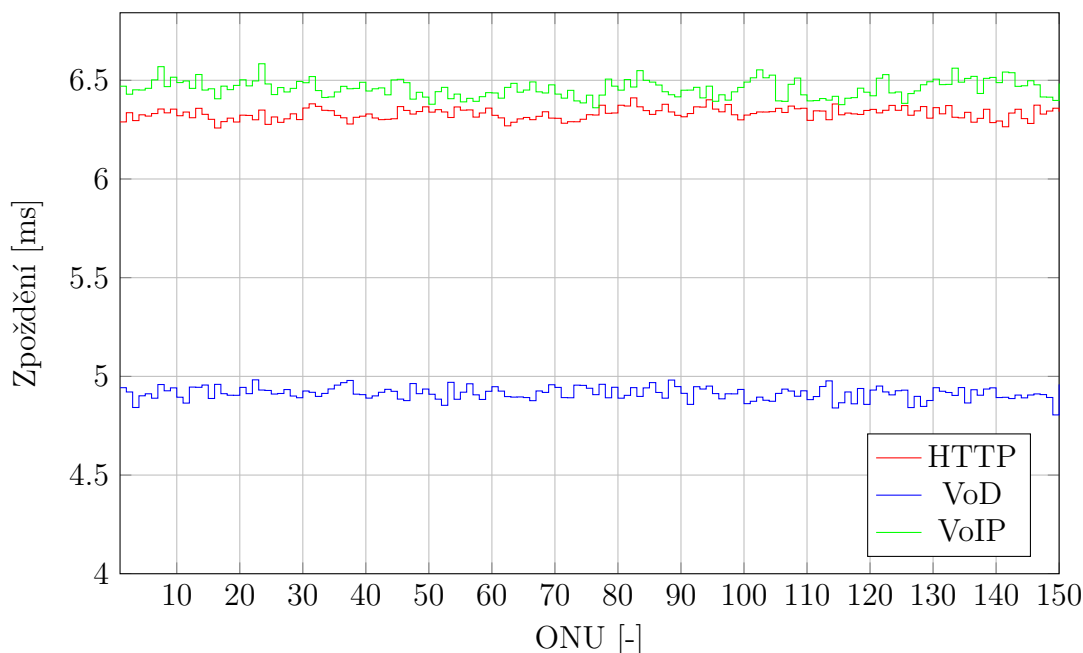
Je patrné, že při využití nízkého počtu ONU jednotek je zatížení sítě malé a jednotlivé ONU jednotky mohou využít větší šířku pásma. Při nízkém počtu ONU jednotek je také patrné, že zpoždění všech 3 služeb, jak je zobrazeno v grafu 5.2, je nízké a pohybuje se okolo 6–7 ms. Ve většině případů je ztrátovost paketů rovna 0 a výsledná přenosová rychlost je konstantní při maximální hodnotě, kterou služby vytváří.



Obr. 5.2: Graf zpoždění přenosu dat při použití 50 ONU jednotkách

Zvýšením počtu ONU jednotek na trojnásobek se razantně zvýší zatížení sítě a je již potřeba pakety zahazovat nebo zpožďovat. V této simulaci je fronta nastavená na 50 KB. Ve výsledku budou pakety zahazovány a dojde tak ke ztrátě dat. Výsledné zpoždění se výrazně nezvýší viz graf 5.3, tedy u HTTP služby o cca 1 ms. Jelikož u VoD služby dojde k razantnímu zahazování paketů viz graf 5.4, sice klesne zpoždění, ale poklesne kvalita služby. Projeví se to delším načítáním videa.

Jakmile se počet ONU jednotek navýší na hodnotu 200, je jednotlivým ONU jednotkám přidělováno ještě menšího počtu prostředků, a tím pádem dojde ke zvýšení zpoždění a u VoD služby k ještě většímu zahazování paketů, jak je zobrazeno



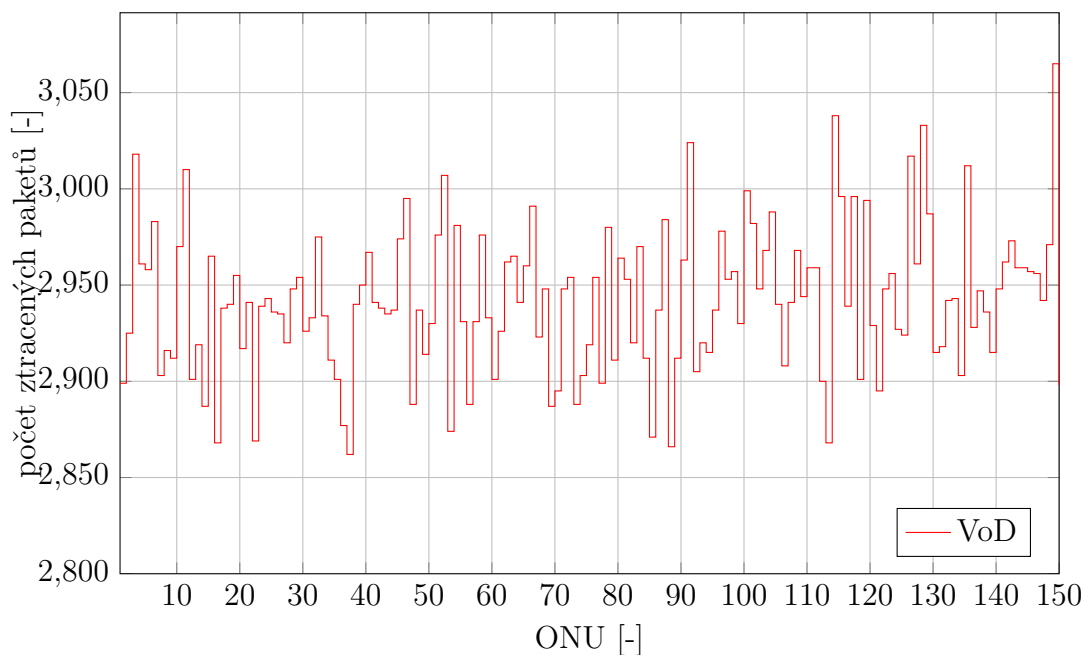
Obr. 5.3: Graf zpoždění přenosu dat při použití 150 ONU jednotek

na grafech 5.5 a 5.6.

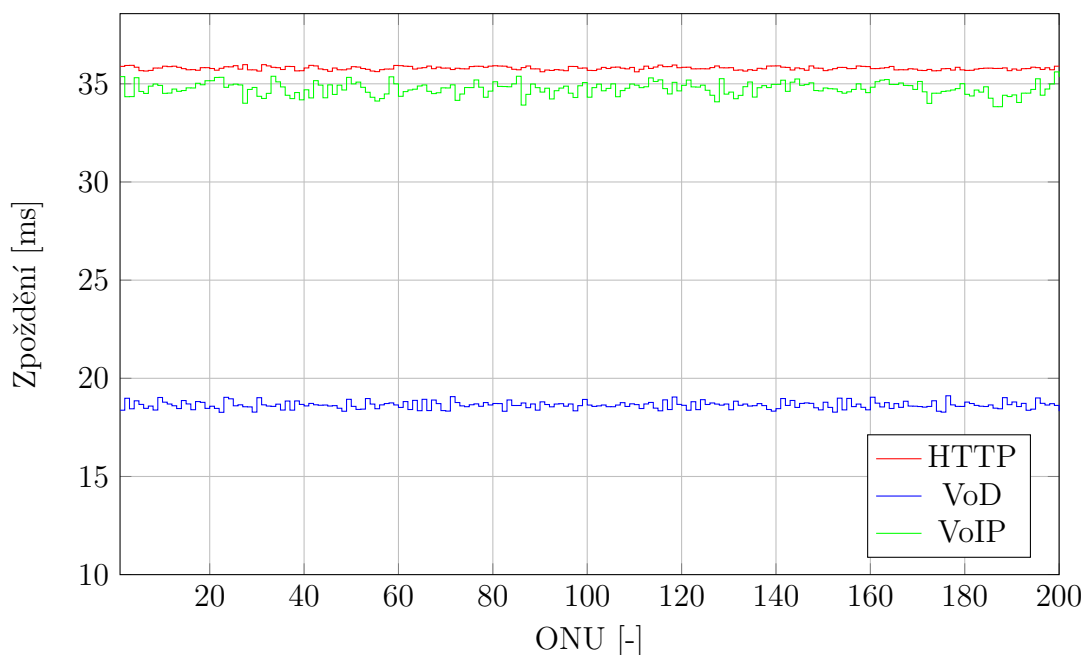
Jelikož round robin nepoužívá fronty s prioritami, jsou zpoždění služby HTTP a VoIP velmi podobné, lišící se v jednotkách ms. Rozdíl je hlavně počtem přenesených paketů. Služby VoD při použití většího počtu ONU jednotek má mnohem menší zpoždění oproti zbylým dvěma službám. Při použití 200 ONU jednotek je rozdíl až o cca 17 ms. To je způsobeno hlavně zahazováním paketů z důvodu zahlcení sítě.

## 5.5 Simulace využívající GIANT DBA

V pořadí druhé simulační schéma využívá propracovanější DBA algoritmus nazývaný se GIANT DBA. Jak již bylo zmíněno výše, algoritmus využívá T-CONT fronty. Implementace GIANT DBA v NS-3 neumožňuje přiřazení paketů do patřičné T-CONT pomocí značkování paketů knihovnou QosTag, která daný paket označí tagem. Rozlišení paketů se provádí na základě IP adresy uzlu, která je pevně svázaná s daným T-CONT. Aby tedy bylo možné datový tok od sebe rozlišit je potřeba v předchozí topologii provést drobnou úpravu a to tak, že uzel představující jedno účastnické zařízení obsluhující všechny 3 služby, rozdělit na 3 stejné uzly, kde každý uzel obsluhuje pouze jeden typ služby. Výsledná topologie je graficky znázorněna na obr. 5.7. Topologie je vytvořena pomocí programu NetAnim. Fixed, assured, non assured a best effort šířky pásma byly nastavované na hodnoty tak aby vždy při

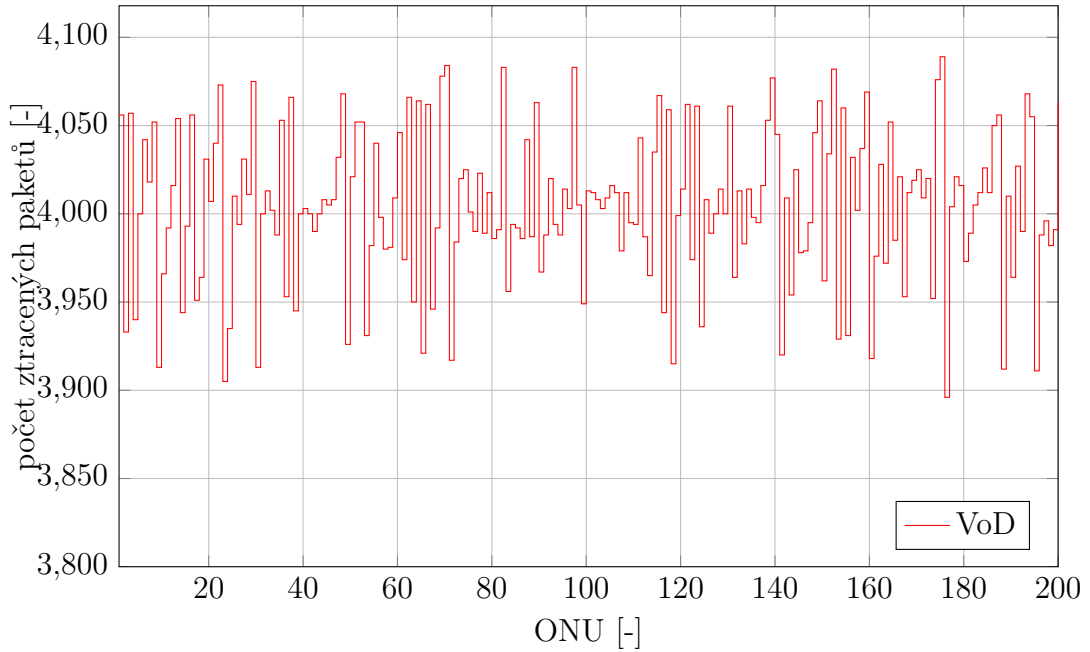


Obr. 5.4: Graf ztráty paketů při použití 150 ONU jednotek

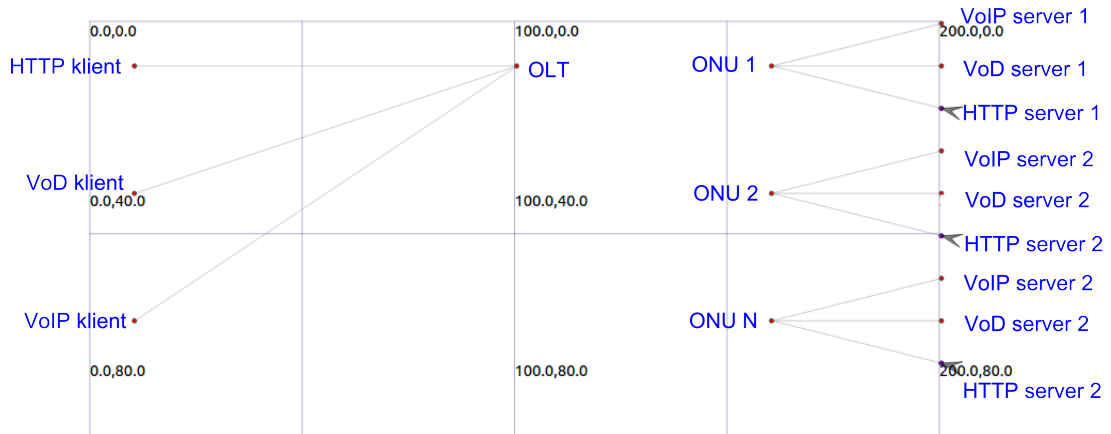


Obr. 5.5: Graf zpoždění přenosu dat při použití 200 ONU jednotek

daném počtu ONU jednotek měly všechny služby dostatek šířky pásma. Jakmile byla překročena maximální fyzická rychlost 2,4 Gb/s, byla volena šířka pásma s největším ohledem na VoIP službu, tedy T-CONT 1, následně na HTTP službu, tedy T-CONT 2. T-CONT 3 byla volena při překročení maxima jako nejmenší priorita. Best effort šířka pásma byla nastaven na 0.



Obr. 5.6: Graf ztráty paketů při použití 200 ONU jednotek



Obr. 5.7: Topologie pro simulaci GIANT DBA

Každý uzel, představující klientské zařízení, bude mít vlastní AllocID, upstream port a downstream port. Navíc každý uzel ze tří uzlů připojených k jedné ONU jednotce bude mít jiný typ T-CONT. Toto se provede pomocí kódu 5.9. Řádky 3–6 slouží identicky jako u předchozího simulačního schématu s použitím round robin k získání referencí na OLT a danou ONU jednotku. 8–13 řádek se používá k nastavení QoS parametrů GIANT DBA, tedy k nastavení Fixed, Assured, NonAssured a maximum šířky pásma. Řádek 14 a 15 je použit pro nastavení maximálního servisního intervalu a minimálního servisního intervalu. Na řádku 19 začíná for cyklus, který zajistí přiřazení potřebných parametrů všem třem klientským zařízením k ONU jednotce. 21 řádek zajišťuje získání adresy klientského zařízení. Následující

řádky 3 řádky slouží pro iterační výběr typu T-CONT. Řádky 26–30 mají obdobnou úlohu jako v předchozím simulačním schématu, tedy přidělují klientským zařazením AllocID, upstream port a downstream port. 32 řádek slouží k přidání AllocID do seznamu, který je nutný k pozdějším úkonům.

Kód 5.9: Nastavení parametrů GIANT algoritmu jednotlivým klientským zařízením

```

1  for(int i=0; i<nOnus; i++)
2  {
3      Ptr<XgponOltNetDevice> oltDevice = DynamicCast<XgponOltNetDevice, NetDevice> (
4      xgponDevices.Get(0));
5      Ptr<XgponOnuNetDevice> onuDevice = DynamicCast<XgponOnuNetDevice, NetDevice> (
6      xgponDevices.Get(i+1));
7
8      xgponHelper.SetQosParametersAttribute ("FixedBandwidth", UIntegerValue (fixedBw[i]) );
9      xgponHelper.SetQosParametersAttribute ("AssuredBandwidth", UIntegerValue (assuredBw[i])
10     );
11     xgponHelper.SetQosParametersAttribute ("NonAssuredBandwidth", UIntegerValue (
12     nonAssuredBw[i]) );
13     xgponHelper.SetQosParametersAttribute ("MaxBandwidth", UIntegerValue (maxBw[i]) );
14     xgponHelper.SetQosParametersAttribute ("MaxServiceInterval", UIntegerValue (siMax[i]) );
15     xgponHelper.SetQosParametersAttribute ("MinServiceInterval", UIntegerValue (siMin[i]) );
16
17     uint8_t tcont = 1;
18
19     for(int y=i*3; y<(i*3)+3; y++)
20     {
21         Address addr = p2pCInterfaces[y].GetAddress(0);
22         XgponQosParameters::XgponTcontType tcontType = static_cast<
23         XgponQosParameters::XgponTcontType>(tcont++);
24         xgponHelper.SetQosParametersAttribute ("TcontType", EnumValue (tcontType) );
25
26         uint16_t allocId = xgponHelper.AddOneTcontForOnu (onuDevice, oltDevice);
27         uint16_t upPortId = xgponHelper.AddOneUpstreamConnectionForOnu (onuDevice,
28         oltDevice, allocId, addr);
29         uint16_t downPortId = xgponHelper.AddOneDownstreamConnectionForOnu (onuDevice,
30         oltDevice, addr);
31
32         allocIdList.push_back(allocId);
33     }
34 }

```

Před spuštěním simulace je ještě potřeba přiřadit počáteční časovače pro fixed, assured, non assured a best effort šířku pásma. Jak je zobrazeno v kódu 5.10, nejdříve je potřeba získat ukazatele na OLT jednotku a DBA engine. Následně se zavolá funkce generující pár AllocOLT s parametry GIANT DBA. Poté se vytvoří potřebné proměnné a následně se provede iteračně přiřazení počátečních časovačů pro všechna AllocID.

Kód 5.10: Nastavení počátečních časovačů

```

1  Ptr<XgponOltNetDevice> oltDevice = DynamicCast<XgponOltNetDevice, NetDevice> (
2  xgponDevices.Get(0));
3  Ptr<XgponOltDbEngine> dbaEngine = oltDevice->GetDbEngine();
4
5  DynamicCast<XgponOltDbEngineGiant, XgponOltDbEngine> (dbaEngine)->
6  GenerateAllocOltGiantParameterPairs();
7
8  std::vector< uint16_t >::iterator it;
9  uint32_t timerIt;
10
11  for (it = allocIdList.begin(), timerIt=0; it!=allocIdList.end(); it++, timerIt++)
12  {

```

```

13 DynamicCast<XgponOltDbEngineGiant, XgponOltDbEngine> (dbaEngine)->SetTimerStartValue(*it,
14 XGPON_GIANT_BW_FIXED, fixedInitialTimers[timerIt]);
15 DynamicCast<XgponOltDbEngineGiant, XgponOltDbEngine> (dbaEngine)->SetTimerStartValue(*it,
16 XGPON_GIANT_BW_ASSURED, assuredInitialTimers[timerIt]);
17 DynamicCast<XgponOltDbEngineGiant, XgponOltDbEngine> (dbaEngine)->SetTimerStartValue(*it,
18 XGPON_GIANT_BW_NON_ASSURED, nonAssuredInitialTimers[timerIt]);
19 DynamicCast<XgponOltDbEngineGiant, XgponOltDbEngine> (dbaEngine)->SetTimerStartValue(*it,
20 XGPON_GIANT_BW_BEST_EFFORT, bestEffortInitialTimers[timerIt]);
21 }

```

Kód 5.11: Nastavení šířek pásma a SI hodnoty pro všechny ONU jednotky

```

1 for (uint32_t i=0; i<nOnus; i++)
2 {
3     fixedBw[i]=fixedBwValue;
4     assuredBw[i]=assuredBwValue;
5     nonAssuredBw[i]=nonAssuredBwValue;
6     maxBw[i]=fixedBw[i]+assuredBw[i]+nonAssuredBw[i]+bestEffortBwValue;
7     siMax[i]=siValue;
8     siMin[i]=siValue;
9 }

```

Ihned poté je potřeba vygenerovat počáteční časovače GIANT DBA algoritmu pomocí 5.12

Kód 5.12: Nastavení počátečních časovačů

```

1 for (uint32_t j=0; j<siValue; j++)
2 {
3     for (uint32_t i=0; i<(nOnus/siValue); i++)
4     {
5         fixedInitialTimers[i+(j*nOnus/siValue)]=j;
6         assuredInitialTimers[i+(j*nOnus/siValue)]=j;
7         nonAssuredInitialTimers[i+(j*nOnus/siValue)]=j;
8         bestEffortInitialTimers[i+(j*nOnus/siValue)]=j;
9     }
10 }

```

Jakmile jsou počáteční časovače vygenerovány, tak následuje vytvoření OLT nodu a ONU nodů. Následně se pomocí xgponHelper a xgponConfigDB provede přiřazení prvního bajtu IP adresy a prefix masky sítě pro OLT a ONU jednotky pomocí kódu 5.13.

Kód 5.13: Nastavení IP adres pro OLT a ONU jednotky

```

1 XgponHelper xgponHelper;
2 XgponConfigDb& xgponConfigDb = xgponHelper.GetConfigDb ( );
3
4 xgponConfigDb.SetOltNetmaskLen (16);
5 xgponConfigDb.SetOnuNetmaskLen (24);
6 xgponConfigDb.SetIpAddressFirstByteForXgpon (10);
7 xgponConfigDb.SetIpAddressFirstByteForOnus (172);

```

První řádek kódu 5.14 představuje získání adresy uzlů pro přiřazení parametrů, 3 a 4 přiřazení typu T-CONT 7 až 10 řádek je již stejný jako v provedení s round robin, a tedy slouží k přiřazení obdobných parametrů koncovým zařízením (uzlům). Poslední tedy 11. řádek slouží k uložení právě vytvořeného AllocID do listů všech AllocID pro pozdější přiřazení počátečních časovačů jednotlivých šířek pásma.

Kód 5.14: Přiřazení uzlům AllocID

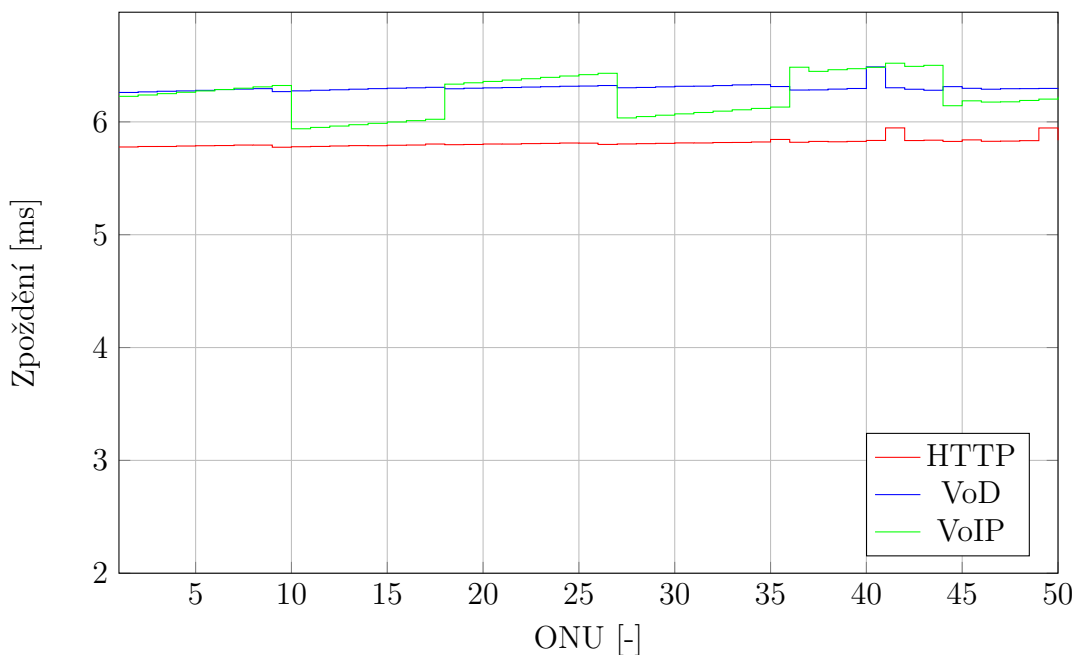
```

1 Address addr = p2pCInterfaces[y].GetAddress(0);
2
3 XgponQosParameters::XgponTcontType tcontType = static_cast<
4 XgponQosParameters::XgponTcontType>(tcont++);
5 xgponHelper.SetQosParametersAttribute ("TcontType", EnumValue (tcontType) );
6
7 uint16_t allocId = xgponHelper.AddOneTcontForOnu (onuDevice, oltDevice);
8 uint16_t upPortId = xgponHelper.AddOneUpstreamConnectionForOnu (onuDevice, oltDevice, allocId,
9 addr);
10 uint16_t downPortId = xgponHelper.AddOneDownstreamConnectionForOnu (onuDevice, oltDevice, addr);
11 allocIdList.push_back(allocId);

```

### 5.5.1 Výsledky simulace

Simulaci obsahující 50 ONU jednotek je získán graf zpoždění 5.8. Zpoždění se pohybuje okolo 6–7 ms až na pár výjimek, které dosahovaly zpoždění v řádu stovek ms. Toto mohlo být způsobeno souhrou několika faktorů, jako je naplnění fronty ihned po vypršení časovače a muselo se tedy čekat delší dobu na přidělení šířky pásma, a dále nedokonalosti algoritmu. Ztrátovost byla u všech služeb rovna 0.

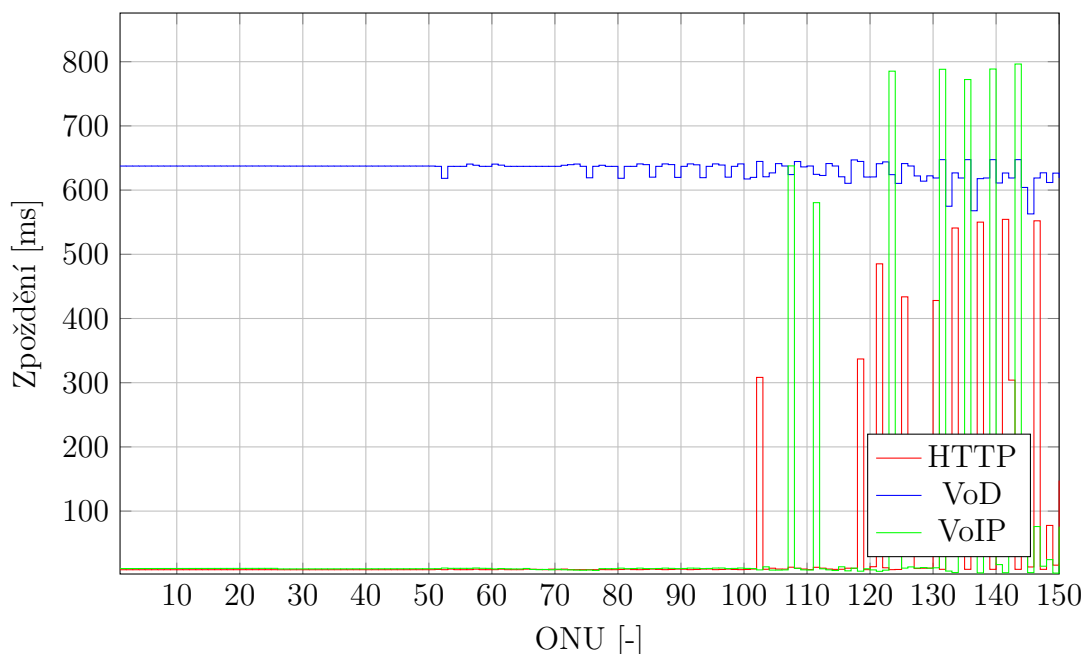


Obr. 5.8: Graf zpoždění přenosu dat při použití 50 ONU jednotek

Zvýšením počtu ONU jednotek na trojnásobek, tedy na 150, je získáván graf zpoždění 5.9. Nejmarkantnější změna oproti předchozí simulaci je zde u služby VoD. Ta nedostává dostatek šířky pásma a setrvává poměrně velký časový úsek ve frontě T-CONT. Ztrátovost paketů je u této služby rovna 0. Jelikož tato služba využívá dopředného načtení na klientské stanici, tak kvalita služby nebude až tak snížena jako v případě, kdy by nastala situace s velkou ztrátovostí paketů a muselo by docházet k opětovnému zasílání. Služby VoIP a HTTP mají podobné výsledky. Pro první 100

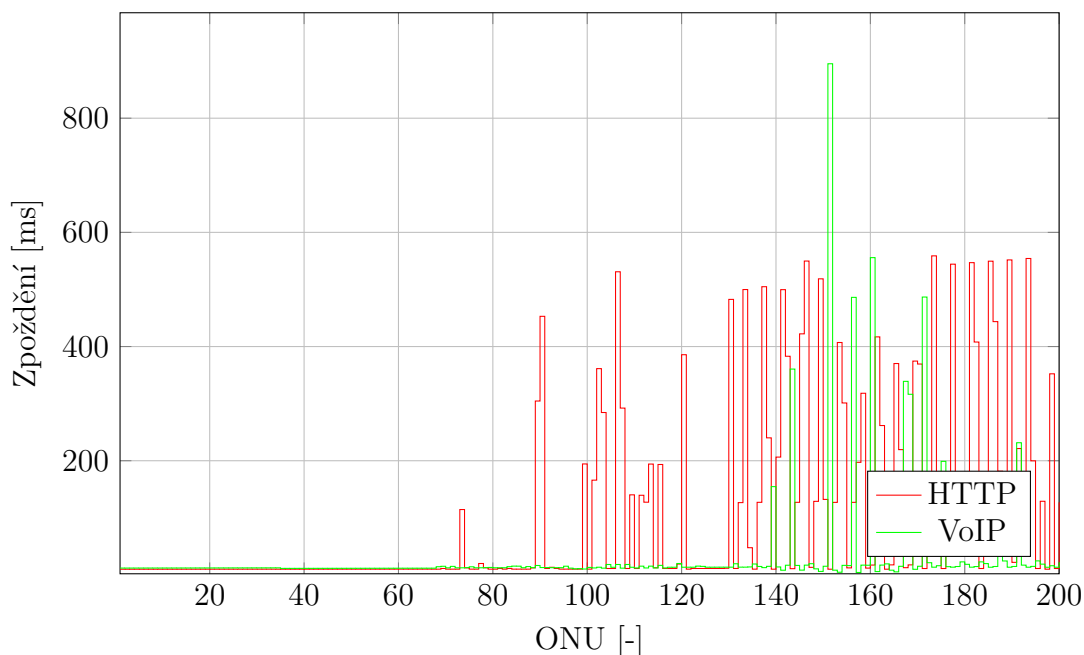


ONU jednotek je zpoždění nízké, nicméně v pořadí další ONU jednotky dosahují většího zpoždění. Pro HTTP službu nebude mít tato skutečnost příliš velký zásah do kvality uživatelského zážitku ze služby, uživatel bude muset pouze čekat delší čas na načtení webové stránky. U VoIP služby již nastává markantnější problém, protože služba je závislá na co nejmenším zpoždění. Jednotky mající zvýšené zpoždění vykazují také ztrátu paketů, což u VoIP služby se markantně projeví na zhoršené kvalitě služby, a na rozdíl od HTTP již nemusí být vůbec hovor proběhnout. U služby HTTP jsou ztráty menší, ale i tak bude muset docházet k opětovnému zaslání paketů a tím prodloužení doby načítání webového obsahu.



Obr. 5.9: Graf zpoždění přenosu dat při použití 150 ONU jednotek

Přidáním ještě dalších 50 ONU jednotek a zvýšením tak celkového počet ONU jednotek na 200, získáme graf zpoždění 5.10. Situace se ještě zhorší protože prostředky získávají ještě menší šířku pásma pro svůj provoz. Pro prvních 60 ONU jednotek je až na zvýšené zpoždění VoD služby služby, nízké zpoždění. Pro další ONU jednotky se situaci zhoršuje. Pro službu HTTP zvýšení zpoždění nebude představovat problematické zhoršení kvality služeb. Z tohoto důvodu získává také menší prioritu. U služby VoIP začíná být zpoždění problematické od 140 ONU jednotek. Kvalitu služby VoIP může v této simulaci více ohrozit ztráta paketů, která je již bohužel u více ONU jednotek viz graf 5.11. Na tomto schématu lze vidět, že GIANT pracuje s frontami a VoIP má v průměru nejmenší zpoždění. Jelikož je této službě přiřazena nejmenší šířka pásma na poslední ONU jednotky se tudíž dostává minimum. Z tohoto důvodu jak lze vidět na 5.11 dochází k zahazování paketů.



Obr. 5.10: Graf zpoždění přenosu dat při použití 200 ONU jednotek

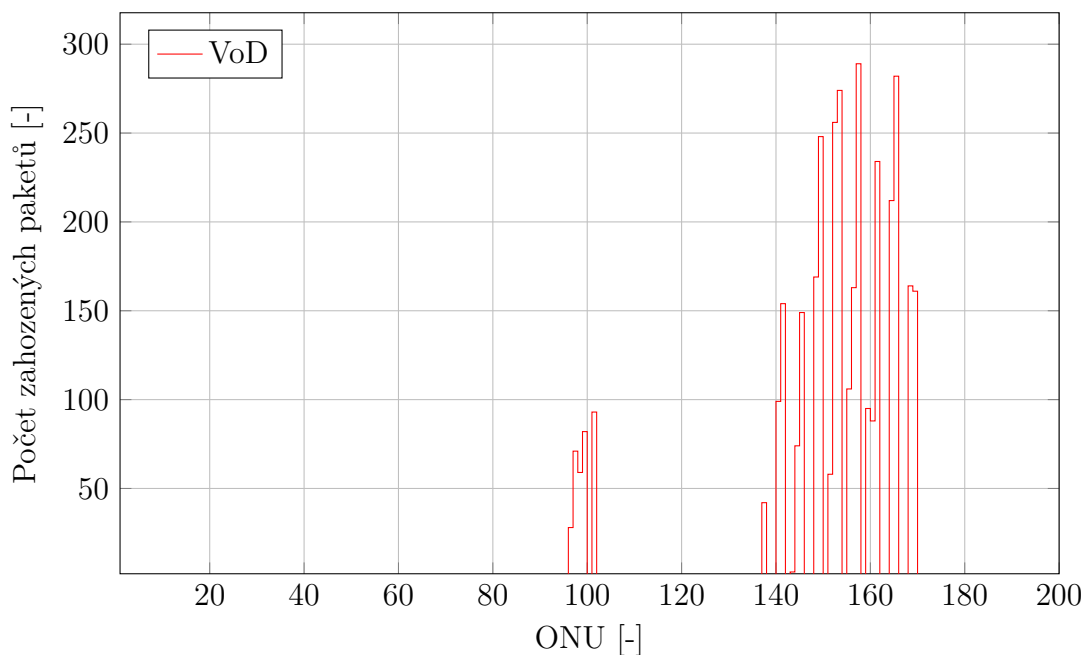
## 5.6 Optimalizace algoritmu GIANT

GIANT DBA při rozhodování o přidělení šířky pásma nejdříve zjistí obsazenost fronty daného T-CONT a na základě typu T-CONT přidělí nebo naopak nepřidělí patřičnou šířku pásma. Jakmile zjistí, že obsazenost fronty pro assured šířku pásma je větší než 1, tak o konkrétní přidělené hodnotě rozhodne na základě 3 podmínek. Pokud je obsazenost fronty, a tedy šířka pásma potřebná pro přidělení menší než 4, tak přidělí hodnotu rovnou právě 4. Pokud tato podmínka neplatí testuje se 2. V té se zjišťuje, zda v dané BWmap bylo v minulosti něco přiděleno. Pokud ano, tak je velikost obsazenosti fronty zvýšena o 1. Pokud ani tato v pořadí druhá podmínka neplatí, otestuje se 3. podmínka, která testuje, zda obsazenost fronty je větší než alokované bajty. Pokud ano, tak přidělená šířka pásma je rovna alokovaným bajtům.

Ještě předtím než-li začne testovat jednotlivé podmínky, zjistí zda časovač daného typu T-CONT vypršel a je tedy roven 0. Pokud ano začne testování podmínek pro přidělení šířky pásma. Má-li časovač hodnotu větší než 0, považuje se za nevypršení a nedochází k testování podmínek přidělujících šířku pásma. Eliminaci této podmínky bude sice docházet k častějšímu přidělování šířky pásma a tedy zvýšení režijních dat, ale také ke snížení výsledného zpoždění.

V XG-PON balíčku pro NS-3 se tato změna provede v souboru *xgpon-olt-dba-engine-giant.cc* na řádce číslo 374. Na řádce 374 se nachází kód 5.15. Modifikace je provedena odstraněním této podmínky.

Kód 5.15: Před modifikací



Obr. 5.11: Graf ztráty paketů VoD služby při použití 200 ONU jednotek

```
1 if ((m_vectorPairIterator->second->GetTimerValue()) == XgponOltDbEngineGiant::TIMER_EXPIRE_VALUE)
```

### 5.6.1 Výsledky simulace

Pro službu HTTP viz tabulka 5.1 je změna velmi podobná i pro službu VoD viz tabulka 5.2. Úpravou bylo zajištěno snížení zpoždění v řádu desetin ms. Konkrétně pro první ONU jednotku se jedná o snížení zpoždění o celých 0,166 ms. Největší změna je viditelná u VoIP služby viz tabulka 5.3, kde ONU jednotka číslo dva měla zpoždění 1722,99 ms. Po úpravě došlo ke snížení zpoždění o 1 713,62 ms. U ostatních jednotek také došlo k většímu snížení zpoždění oproti ostatním službám.

Tab. 5.1: Zpoždění přenosu dat HTTP služby před a po úpravě GIANT DBA.

HTTP				
	ONU 1	ONU 2	ONU 3	jednotky
<b>před změnou</b>	6,02672	6,03104	6,03535	ms
<b>po změně</b>	5,86038	5,86469	5,86871	ms

Nasazení změny, ale není vhodné pro vysoký počet ONU jednotek. Při výskytu častých změn obsazenosti front ONU jednotek, a tedy nutnosti zasílat většímu počtu ONU jednotek nově přidělenou šířku pásma, začne docházet k přehlcení BWmap.

Tab. 5.2: Zpoždění přenosu dat VoD služby před a po úpravě GIANT DBA.

VoD				
	ONU 1	ONU 2	ONU 3	jednotky
<b>před změnou</b>	6,29533	6,29521	6,30504	ms
<b>po změně</b>	6,02543	6,02301	6,03363	ms

Tab. 5.3: Zpoždění přenosu dat VoIP služby před a po úpravě GIANT DBA.

VoIP				
	ONU 1	ONU 2	ONU 3	jednotky
<b>před změnou</b>	6,31226	1722,92	6,18854	ms
<b>po změně</b>	5,81226	9,30157	5,69479	ms

BWmap je omezena na maximální počet 512 současných alokací. Při přehlcení BWmap by ONU jednotka nedostala přiřazení ihned ale se zpožděním minimálně  $125 \mu s$ , v závislosti na produkci následující BWmap.

Z grafu 5.12 je patrné, že po přidání dalších ONU jednotek (celkem na 32 ONU) se zpoždění razantně zmenší. Menší zpoždění nastane také u služby VoD viz graf 5.13. U služby VoIP je změna také velmi znatelná viz graf 5.14. U dvou jednotek algoritmus způsobil mnohonásobně větší zpoždění. Bez modifikace dosahovala ONU jednotka číslo 12 zpoždění 247.585 ms a ONU jednotka číslo 24 zpoždění 14.4519 ms. U 12. jednotky došlo tedy k razantnímu snížení zpoždění až o 239,74395 ms. Velmi velké zpoždění bylo pravděpodobně způsobeno nedokonalostí algoritmu.

## 5.7 GNU Plot

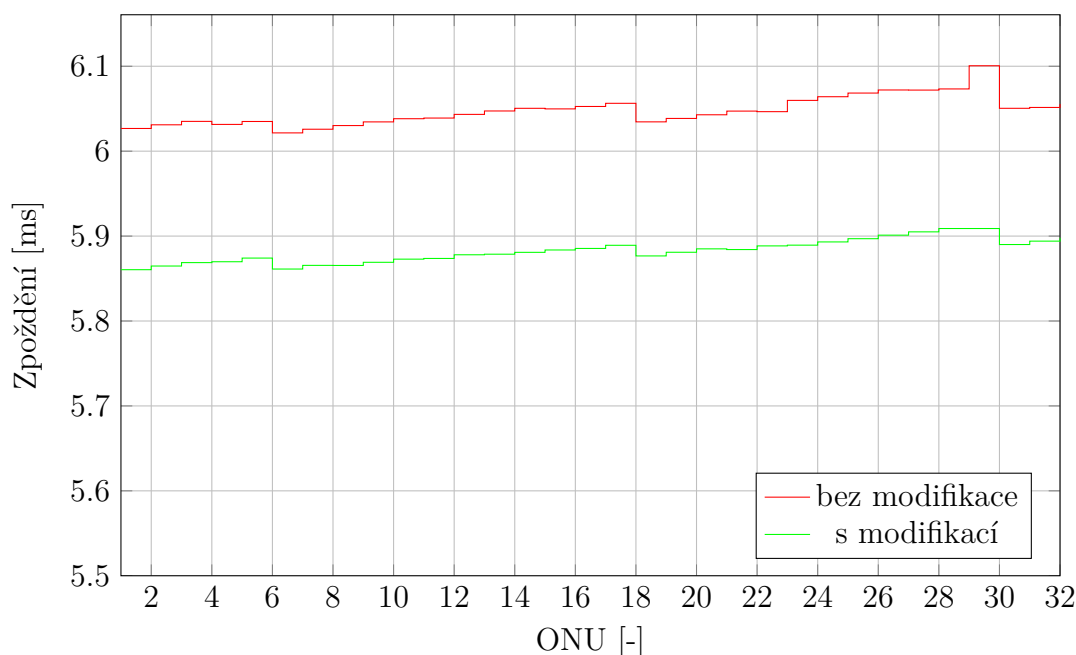
NS-3 obsahuje také knihovnu pro tvorbu grafického výstupu simulace v podobě grafů. Název knihovny je odvozen z programu GNU Plot, který slouží k vykreslování grafů. GNUPlot knihovna slouží pro rozdělení dat do podoby vhodné pro vykreslení grafu pomocí GNU Plot programu [17].

Pro vytvoření výstupu dat je nejprve potřeba vytvořit pomocí 5.16 monitor, který bude monitorovat přenos dat. Následně se jej nainstaluje na všechna zařízení v simulaci.

Kód 5.16: Vytvoření monitoru

```

1 Ptr<FlowMonitor> monitor;
2 FlowMonitorHelper flowmon;
```



Obr. 5.12: Graf zpoždění přenosu HTTP služby při použití 32 ONU jednotek

```

3 |
4 | monitor_http = flowmon_http.InstallAll();

```

Jakmile je monitor připraven, vytvoří se Gnuplot tak jak je zobrazeno na 5.17, kterému předáme pomocí proměnných informace jako je název výsledného souboru a popisky dat. Poslední řádek slouží k nastavení pro GNUPlot program, kterým z výsledných dat vytvoří právě nastavený png obrázek. Gnuplotů je celkem 3, protože na konci simulace jsou vygenerovány grafy zobrazující zpoždění, ztrátovost paketů a přenosová rychlost.

Kód 5.17: Vytvoření a nastavení Gnuplot

```

1 | Gnuplot gnuplot (graphicsFileName);
2 | gnuplot.SetTitle (plotTitle);
3 | gnuplot.SetLegend ("Poradi_klientu", "Zpozdeni_[ms]");
4 | gnuplot.AppendExtra("set_grid");
5 | gnuplot.SetTerminal ("png");

```

Pro rozlišení jednotlivých dat se použije *dataset* viz 5.18. Datasety jsou vytvořeny celkem 3 pro každou službu (HTTP, VoD, VoIP) zvlášť.

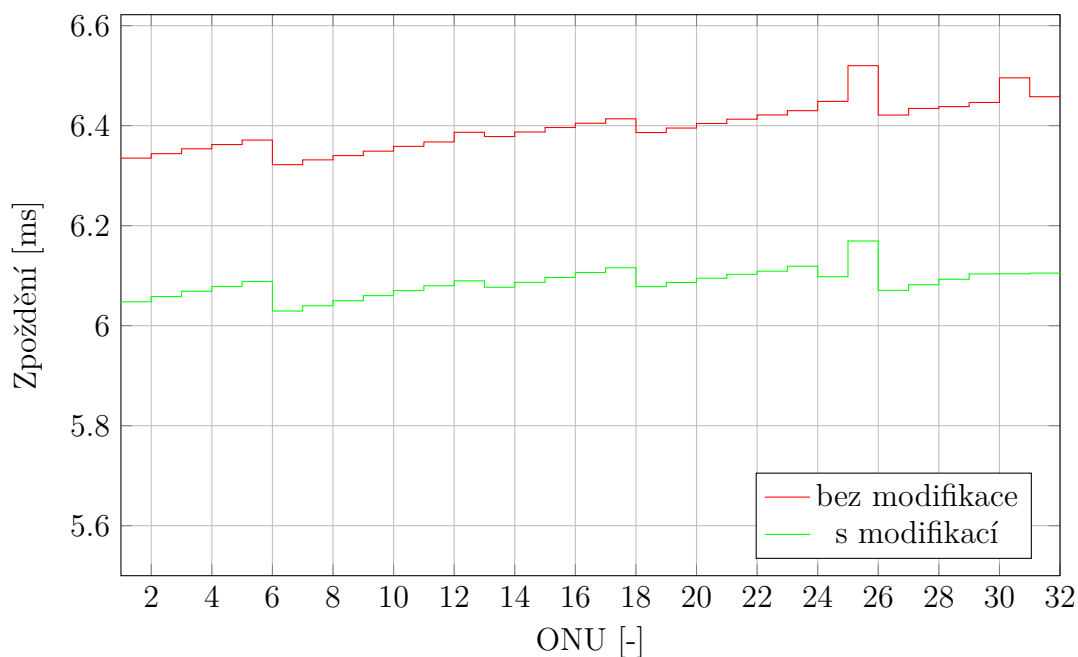
Kód 5.18: Vytvoření a nastavení datasetu

```

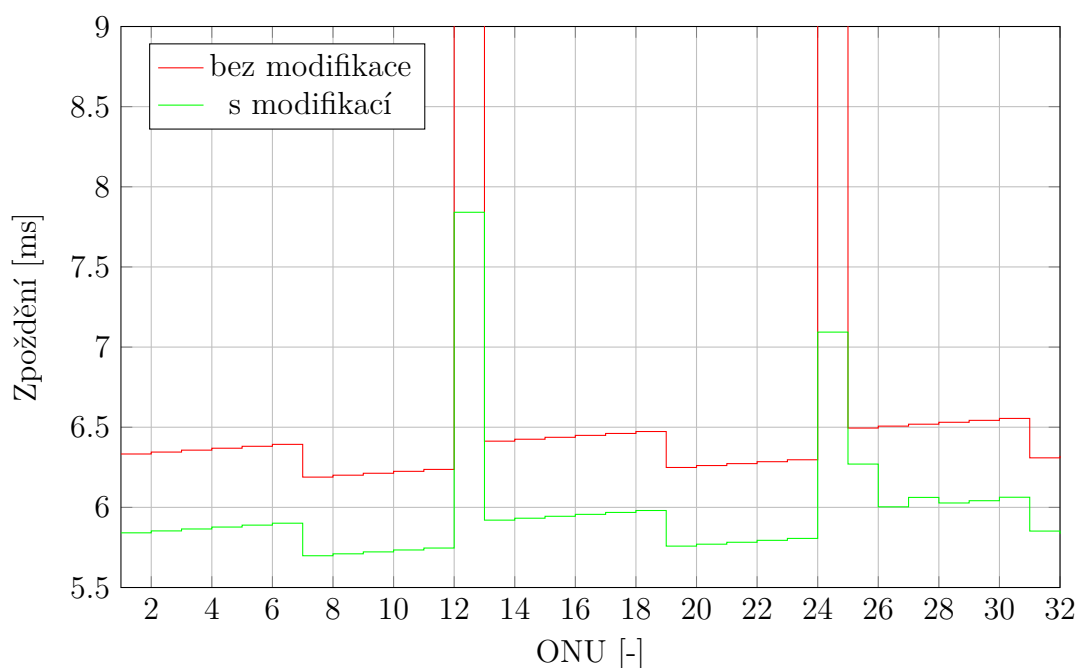
1 | Gnuplot2dDataset dataset_vod;
2 | dataset_vod.SetTitle(dataTitle_vod);
3 | dataset_vod.SetStyle (Gnuplot2dDataset::STEPS);

```

V dalším kroku se postupně prochází všechny zaznamenané průtoky dat. A data se setřídí do jednotlivých datasetů, a to tak jak je zobrazeno v kódu 5.19, tedy pomocí adresy cíle. Datový tok, který je potřeba odfiltrovat, vždy směřuje na jednoho ze tří klientů, proto po zjištění adresy cíle (klienta), je zjištěna také přenášená služba.



Obr. 5.13: Graf zpoždění přenosu VoD služby při použití 32 ONU jednotek



Obr. 5.14: Graf zpoždění přenosu VoIP služby při použití 32 ONU jednotek

#### Kód 5.19: Modifikovaný kód před modifikací

```
1 if (t.destinationAddress==p2pSInterfaces[0].GetAddress(0))
```

Kód 5.20 zobrazuje ošetření proti výskytu 0, a tím způsobení pádu aplikace. V simulacích může nastat například situace, kdy ONU jednotka nedostane přidělen

dostatek šířky pásma a dojde tak k zahození všech paketů. V takové to situaci bude hodnota vrácená funkcí *iter->second.delaySum.GetSeconds()* rovna 0 a při výpočtu zpoždění dojde k dělení nulou.

Kód 5.20: Ošetření výskytu nulové hodnoty

```
1 if (iter->second.delaySum>0)
2 {
3     Delay = (iter->second.delaySum.GetSeconds() / iter->second.txPackets)*1000;
4     dataset_vod.Add((double)vod_count,(double) Delay);
5     dataset_vod2.Add((double)vod_count,(double) (iter->second.rxBytes * 8.0 /
6 (iter->second.timeLastRxPacket.GetSeconds()-iter->second.timeFirstTxPacket.GetSeconds()) /
7 1024));
8 }
```

Na konec se pomocí kódu 5.21, přidají jednotlivé datasety do patřičných grafů. Pote se vygenerují výstupní data do souboru typu plt. Po uzavření souboru se zavolá systémový příkaz pro vygenerování grafu v podobě obrázku png pomocí posledního řádku kódu 5.21.

Kód 5.21: Závěrečná tvorba jednoho z grafů

```
1 gnuplot.AddDataset (dataset_http);
2 gnuplot.AddDataset (dataset_vod);
3 gnuplot.AddDataset (dataset_voip);
4
5 gnuplot.GenerateOutput (plotFile);
6 plotFile.close ();
7 system("gnuplot_Pavel/giant/zpozdeni.plt");
```

## 5.8 Net Anim

Dalším balíčkem použitým pro vytvoření výstupních dat simulace je balíček Net Anim. Ten generuje data pro program NetAnim, který umí následně vytvořit animaci pohybu paketů v síti. Tímto programem je vytvořena topologie sítě 5.7.

## 6 ZÁVĚR

Simulacemi bylo ověřeno, že použití propracovanějšího simulačního schématu je velkou výhodou a nutností pro provozování triple play služeb v XG-PON. Při malém zatížení sítě, kdy je do ODN připojeno malé množství ONU jednotek generující malé zatížení sítě, není potřeba kvalitnějšího algoritmu, nicméně grafy 5.2 a 5.8 vykazují i v takové to situaci nižší zpoždění v podání GIANT DBA. Zvýší-li se markantně zatížení sítě, například připojením celkově 200 ONU jednotek, vzniká již nutnost použít sofistikovanější DBA algoritmus jako je GIANT DBA. Použití jednoduchého přidělování šířky pásma a klasifikace všech typů služeb jako jednoduší tok dat má za následek zvýšení zpoždění všech služeb, a hlavně u služby jako VoIP toto zpoždění může vést k razantnímu zhoršení kvality služby nebo dokonce k neuskutečnění hovoru. Porovnáním grafu 5.10 a grafu 5.5 došlo k potvrzení teorie, že díky použití T-CONT GIANT DBA algoritmem lze při velkém zatížení sítě používat VoIP službu, která je ze všech tří služeb nejnáchylnější na přenosové parametry sítě. Služba VoD může mít zhoršenou kvalitu služby stejně jako služba HTTP na ONU jednotkách s vyšším pořadovým číslem. Tomu se již nelze vyhnout z důvodu překročení maximální přenosové rychlosti ve vzestupném směru XG-PON sítě. Simulace využívá nepřetržitě vysokého toku dat, pro odsimulování XG-PON sítě i v nejnáročnější situaci. V reálném provozu, až na nejnáročnější situace, bude tok dat ve vzestupném směru nižší, protože role serverů a klientů budou ve většině případů obrácené a datový tok nebude přenášen nepřetržitě.

Modifikací GIANT DBA algoritmu, jak dokazuje graf 5.14, došlo k úspěšnému snížení zpoždění přenosu dat na úkor přenosu většího počtu režijních dat přenášených pomocí BWmap.



# LITERATURA

- [1] LAFATA, P. *Pasivní optické sítě s rychlostí 10 Gbit/s*. České vysoké učení technické v Praze, FEL, [online]. 10. 3. 2011 [cit. 2015-10-10]. Dostupné z URL: <<http://access.feld.cvut.cz/rservice.php?akce=tisk&cislocclanku=2011030001>>.
- [2] ITU-T *G.987.2: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Physical media dependent (PMD) layer specification*. [online]. Ženeva, Švýcarsko, 2010. [cit. 2015-11-09] Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.2/en>>.
- [3] KOČÍ, L. *VLIV VELIKOSTI RÁMCE NA DĚLICÍ POMĚR V PASIVNÍCH OPTICKÝCH SÍTÍCH XG-PON*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. Vedoucí práce Ing. Petr Münster, Ph.D. [cit. 2015-06-31] <[https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp\\_id=85326](https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=85326)>.
- [4] ITU-T *G.987.3: 10-Gigabit-capable passive optical networks (XG-PON): Transmission convergence (TC) layer specification*. [online]. Ženeva, Švýcarsko, 2014. [cit. 2015-12-04] Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.987.3/en>>.
- [5] ITU-T *G.984.3 Amendment 2: Gigabit-capable Passive Optical Networks (G-PON): Transmission convergence layer specification Amendment 2: Time-of-day distribution and maintenance updates and clarifications*. [online]. Ženeva, Švýcarsko, 2009. [cit. 2015-10-06] Dostupné z URL: <<https://www.itu.int/rec/T-REC-G.984.3-200911-S!Amd2/en>>.
- [6] MAN-SOO H. *Simple and Feasible Dynamic Bandwidth Allocation for XGPON*. Advanced Communication Technology (ICACT), 2013 15th International Conference on [online]. IEEE, 2013 s. 341-344 [cit. 2015-11-05]. ISBN 978-1-4673-3148-7 Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6488201&newsearch=true&queryText=Simple%20and%20Feasible%20Dynamic%20Bandwidth%20Allocation%20for%20XGPON>>.
- [7] KANJANOPAS, Pichitra, Rachata MANEEKUT a Pasu KAEWPLUNG. *FTTx with dynamic wavelength and bandwidth allocation*. In: The International Conference on Information Networking 2014 (ICOIN2014) [online]. IEEE, 2014, s. 517-520 [cit. 2015-11-06]. DOI: 10.1109/ICOIN.2014.6799735.

- ISBN 978-1-4799-3689-2. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6799735>>.
- [8] QIONGLING SHI, CHAOQIN GAN, XUEJIAO MA a DENG FENG YANG. *Dynamic Bandwidth Allocation using prediction in WDM/TDM passive optical network*. In: IET International Communication Conference on Wireless Mobile and Computing (CCWMC 2011) [online]. IET, 2011, s. 375-378. DOI: 10.1049/cp.2011.0913. ISBN 978-1-84919-505-8 [cit. 2015-10-08]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6194868&tag=1>>.
- [9] RAWSHAN, Fahmida, MinChul JU a Youngil PARK. *Application of a multi-OLT PON system and its dynamic bandwidth allocation algorithm..* In: 2012 Fourth International Conference on Ubiquitous and Future Networks (ICUFN) [online]. IEEE, 2012, s. 276-279 [cit. 2015-10-20]. DOI: 10.1109/ICUFN.2012.6261710. ISBN 978-1-4673-1378-0. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6261710>>.
- [10] DIN, Norashidah Md, Nurul Asyikin Md RADZI, Sajaa Kh SADON a Mohammed Hayder AL-MANSOORI. *Approaches in Dynamic Bandwidth Allocation in Passive optical network systems*. In: 2013 IEEE 4th International Conference on Photonics (ICP) [online]. IEEE, 2013, s. 10-14 [cit. 2015-11-06]. DOI: 10.1109/ICP.2013.6687054. ISBN 978-1-4673-6075-3. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=6687054>>.
- [11] HAKJEON B., SUNGCHANG K., DONG-SOO L., CHANG-SOO P. *Dynamic Bandwidth Allocation Method for High Link Utilization to Support NSR ONUs in GPON*. In: Advanced Communication Technology (ICACT), 2010 The 12th International Conference on (Volume:1 ) [online]. IEEE, 2010 s. 884-889 [cit. 2015-11-01]. ISBN 978-1-4244-5427-3 Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=5440137&newsearch=true&queryText=Dynamic%20Bandwidth%20Allocation%20Method%20for%20High%20Link%20Utilization%20to%20Support%20NSR%20ONUs%20in%20GPON>>.
- [12] GRAVALOS, Ilias, Konstantinos YIANNPOULOS, Georgios PAPADIMITRIOU a Emmanouel A. VARVARIGOS *A modified max-min fair dynamic bandwidth allocation algorithm for XG-PONs*. In: 2014 19th European Conference on Networks and Optical Communications - (NOC) [online]. IEEE, 2014, s. 57-62. DOI: 10.1109/NOC.2014.6996828. ISBN 978-1-4799-3872-8

- [cit. 2015-11-15]. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=6996828&newsearch=true&queryText=A%20Modified%20Max-Min%20Fair%20Dynamic%20Bandwidth%20%20Allocation%20Algorithm%20for%20XG-PONs%20>>.
- [13] AROKKIAM, Jerome A., Kenneth N. BROWN a Cormac J. SREENAN. *Refining the GIANT dynamic bandwidth allocation mechanism for XG-PON*. In: 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC) [online]. IEEE, 2015, s. 1006-1011 [cit. 2015-12-03]. DOI: 10.1109/ICC.2015.7248454. ISBN 978-1-4673-6432-4. Dostupné z URL: <<http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?arnumber=7248454>>.
- [14] LELIGOU, H. C., Ch. LINARDAKIS, K. KANONAKIS, J. D. ANGELOPOULOS a Th. ORPHANOUDAKIS. *Efficient medium arbitration of FSAN-compliant GPONs*. International Journal of Communication Systems [online]. 2006, 19(5), 603-617 [cit. 2015-10-01]. DOI: 10.1002/dac.761. ISSN 1074-5351. Dostupné z URL: <<http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/dac.761/abstract>>.
- [15] KANTARCI, B a H T MOUFTAH. *On SLA constraints in dynamic bandwidth allocation for long-reach passive optical networks*. In: 2010 12th International Conference on Transparent Optical Networks [online]. IEEE, 2010, s. 1-7 [cit. 2015-11-16]. DOI: 10.1109/ICTON.2010.5549067. ISBN 978-1-4244-7799-9. <<http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=5549067>>.
- [16] WU X. , BROWN K. N. , SREENAN C. J., AROKKIAM J. *An XG-PON Module for the NS-3 Network Simulator: the Manual*. 2014. [cit. 2016-01-20]
- [17] MAŠEK, P. *QoS model pro mobilní AD HOC sítě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2012. Vedoucí práce Ing. Pavel Vajsar [cit. 2015-04-20] <[https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp\\_id=66700](https://www.vutbr.cz/studium/zaverecne-prace?zp_id=66700)>.

## SEZNAM SYMBOLŮ, VELIČIN A ZKRATEK

DBA	Dynamic Bandwith Allocation
XG-PON	Next Generation-Passive Optical Network
GPON	Gigabit Passive Optical Network
OLT	Optical Line Terminal
ONU	Optical Network Unit
P2MP	Point-to-Multipoint
ODN	Optical Distribution Network
NGA1	Next Generation Access 1
NGA2	Next Generation Access 2
WDM	Wavelength Division Multiplexing
TDMA	Time Dividion Multiple Access
NRZ	Non Return to Zero
FEC	Forward Error Correnction
XGTC	XG-PON Transmission Convergence Layer
SDU	Service Data Unit
PHY	Physical Interface
PMD	Physical Medium Dependent
OMCI	ONU Management and Control Interface
XGEM	XG-PON Encapsulation Method
OAM	Operations, Administrations and Maintenance
PLOAM	Physical Layer Operations, Administrations and Maintenance
OMCI	ONU Management Control Interface
SFC	SuperFrame Counter
PSync	Physical Synchronization Sequence

PSBd	Downstream Physical Synchronization block
SR	status reporting
TM	traffic monitoring
SI	Service Interval
GIANT	GigaPON Access Network
IA	Immediate Allocation
HTTP	Hypertext Transfer Protocol
VoD	Video on Demand
VoIP	Voice over IP

# SEZNAM PŘÍLOH

A Obsah přiloženého DVD

55

## A OBSAH PŘILOŽENÉHO DVD

- Elektronická verze práce (PDF)
- Zdrojový kód simulace s round robin
- Zdrojový kód simulace s GIANT DBA
- Surová data grafů
- Externí obrázky